

JUCIARA OLIVEIRA LOPES

**MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE METANO E DO BALANÇO ENERGÉTICO
EM BIODIGESTORES MODELO LAGOA COBERTA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: André Pereira Rosa
Coorientadores: Alisson Carraro Borges
Joyce Correna Carlo

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

L864m
2020
Lopes, Juciara Oliveira, 1992-
Modelagem da produção de metano e do balanço energético
em biodigestores modelo lagoa coberta / Juciara Oliveira Lopes.
– Viçosa, MG, 2020.
76 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: André Pereira Rosa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Biogás. 2. Resíduos de animais. 3. Digestão anaeróbia.
4. Modelos matemáticos. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 665.776

JUCIARA OLIVEIRA LOPES

**MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE METANO E DO BALANÇO ENERGÉTICO
EM BIODIGESTORES MODELO LAGOA COBERTA**

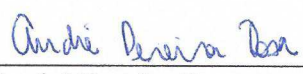
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Juciara Oliveira Lopes
Autora



André Pereira Rosa
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Pai do Céu, minha força e coragem para a realização desta conquista, pelas constantes bênçãos em minha vida, pela fé renovada em cada desafio e em cada cuidado e a Nossa Senhora pela fiel intercessão.

Ao meu orientado prof. Dr. André Rosa, por todos os ensinamentos transmitidos, oportunidade, incentivo, confiança e paciência, e por todos os sacrifícios com os horários extras dedicados. Aos meus coorientadores Alisson Borges e Joyce Carlo, por todos ensinamentos ao longo desta trajetória, e orientações concedidas para esse trabalho.

Aos meus pais Geraldo Lopes e Maria das Graças, exemplos de força e fé, pelo amor incondicional e por toda dedicação, esforço, e apoio para com a minha formação. Aos meus irmãos Júnior e Ana Jusciléia e meu cunhado Edimilson pelo apoio e carinho. Ao meu sobrinho Bernardo, pelo amor inocente. Ao professor Danilo, por todo o incentivo para essa conquista. A minha amiga Poliana Lopes, e sua grande família por toda acolhimento e amor de família que me proporcionaram em Viçosa. Ao Ministério Universidades Renovadas, por ter contribuído tanto com minha vida de fé. E a todos meus familiares e amigos pela torcida e pelas orações.

Aos alunos de iniciação científica e estagiários, Nathalia, Antonella e Silas por toda dedicação e comprometimento com o desenvolvimento da pesquisa. Ao grupo Bioenergia, em especial ao Baltazar, e aos técnicos de laboratório Simão e Dilson, por toda colaboração ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Ao Luciano e toda sua equipe da Granja Panorama, pela parceria com essa pesquisa.

A família LQA pela amizade, companheirismo, e diversa caronas em especial a Ana Paula, quem me acolheu em Viçosa com muito amor, e a Amanda Braga, Letícia e Amanda Dias pelos almoços, conselhos e tantos momentos compartilhados além dos “muros” da universidade, a Isabelle minha eterna companheira de “desespero”, sempre disposta a ajudar, a Cris pelas sábias palavras e solicitude, a Lucas, por toda solicitude, preocupação e cuidado.

Aos membros da banca avaliadora deste trabalho, por terem aceitado o convite, contribuindo com as correções necessárias para aprimoramento dessa pesquisa.

A Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade dos estudos, e todos meus mestres e servidores técnicos, que de alguma forma contribuíram para minha formação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho

Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho ou para a minha formação, obrigada.

*“Recebei a instrução e não o dinheiro, preferi a ciência ao fino ouro,
pois a sabedoria vale mais que as pérolas e joia alguma pode igualar”.*
(Sabedoria 8, 10-11)

RESUMO

LOPES, Juciara Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Modelagem da produção de metano e do balanço energético em biodigestores modelo lagoa coberta.** Orientador: André Pereira Rosa. Coorientadores: Alisson Carraro Borges e Joyce Correna Carlo.

Os biodigestores modelo lagoa coberta (BLC) tem sido amplamente empregado no Brasil, especialmente no tratamento dos efluentes de suinocultura. Entretanto há necessidade de parâmetros de projeto mais apropriados à realidade brasileira. Assim, neste estudo propôs-se a avaliação e o aprimoramento de modelos de estimativas de produção de metano e simulação de balanços energéticos, em BLC, para auxílio na projeção destes. Para isso, foram avaliados quatro modelos matemáticos para a estimativa de biogás já consolidados na literatura sendo eles, modelo de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983), CETESB (2006), Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016) e IPCC (2006), com proposição de ajustes em casos cabíveis de aprimoramento. Foram avaliados, ainda, dois modelos de simulação do balanço energético em BLC no software *EnergyPlus*, com uma e duas zonas térmicas. Para aplicação e simulação dos modelos, foram utilizados dados obtidos por meio de monitoramento de BLC em escala plena instalados em uma granja suinícola em Teixeiras - MG. Os coeficientes e dados adicionais foram selecionados na literatura disponível. A média mensal dos resultados dos modelos matemáticos foi comparada com a produção monitorada na granja (P_{real}), por meio do teste T para um nível de significância de 5%. O erro médio (BIAS) foi utilizado para termos comparativos da qualidade dos modelos matemáticos. Os modelos de simulação do balanço energéticos foram avaliados pelos indicadores de desempenho Raiz do erro quadrático médio (REQM) e Raiz do erro quadrático médio relativo (REQMR). O modelo do IPCC e de Chen-Hashimoto foram iguais estatisticamente a P_{real} ($405,0 \text{ m}^3_{CH_4} \text{ d}^{-1}$), já o modelo da CETESB e de Conversão de DQO necessitaram de ajustes, encontrando melhor desempenho qualitativo do modelo da CETESB após ajustes, com BIAS de $12,2 \text{ m}^3_{CH_4} \text{ d}^{-1}$. Quanto à simulação de balanço energético, o modelo de simulação com duas zonas térmicas, de modo geral, apresentou melhor desempenho e fidedignidade as temperaturas do biogás e biomassa residente em biodigestores modelo lagoa coberta, especialmente no período de inverno (REQM de $1,9^\circ \text{C}$ e $4,2^\circ \text{C}$ e REQMR de 9,0% e 24,6%, para biomassa e biogás, respectivamente). Os resultados deste trabalho possibilitaram o aprimoramento de estimativas da produção de biogás e de modelos de simulação das temperaturas e ganhos energéticos em

biodigestores modelo lagoa coberta, fornecendo informações concisas para auxílio na projeção de biodigestores.

Palavras-chave: Biogás. Dejetos suínos. Digestão anaeróbia. Modelos.

ABSTRACT

LOPES, Juciara Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Modeling of methane production and energy balance in covered lagoon biodigesters.** Advisor: André Pereira Rosa. Co-advisors: Alisson Carraro Borges and Joyce Correna Carlo.

Covered lagoon biodigesters (CLB) have been widely used in Brazil, especially in the treatment of pig farming effluents. However, it is necessary to apply design parameters more appropriate to the Brazilian reality. Thereby, this study proposed to evaluate and improve models for estimating methane production and simulating energy balances in CLBs, in order to aid their projection. For this, four consolidated mathematical models were evaluated to estimate biogas production, namely: Chen-Hashimoto model (CHEN, 1983), CETESB (2006), COD Conversion (CHERNICHARO, 2016) and IPCC (2006). In addition, adjustments have been proposed in models that could be improved. Two different models of CLB energy balance simulation using the software Energy Plus were evaluated: with one and two thermal zones. The data for modeling and simulation were obtained through monitoring of a full-scale CLB installed in a pig farm in Teixeira - MG. The coefficients and additional data were selected from the literature. The monthly average of the mathematical model's results was compared with the production monitored on the farm (P_{actual}), using the test T for a significance level of 5%. The mean bias error (MBE) was used to compare the mathematical model's quality. The energy balance simulation models were evaluated by the performance indicators: Root mean squared error (RMSE) and the Root relative squared error (RRSE). The IPCC and Chen-Hashimoto models were statistically equal to P_{actual} ($405.00 \text{ m}^3_{\text{CH}_4} \text{ d}^{-1}$). The CETESB and COD Conversion models needed adjustments. After the adjustments, the CETESB model achieved a better qualitative performance, with an MBE of $12.21 \text{ m}^3_{\text{CH}_4} \text{ d}^{-1}$. Regarding the energy balance simulation, the simulation model with two thermal zones, in general, showed a better performance and a higher reliability at the biogas and resident liquid temperatures inside the covered lagoon biodigesters. These results were even more evident in the winter period with RMSE of 1.88°C and 4.21°C ; and RRSE of 9.02% and 24.56% for resident liquid and biogas, respectively. The results of this research contributed to improve estimates of biogas production and simulation models of temperatures and energy gains in covered lagoon biodigesters, providing concise information in order to aid in the biodigesters projection.

Keywords: Biogas. Swine manure. Anaerobic digestion. Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma com as etapas metodológicas do estudo	20
Figura 2.2 – Croqui da distribuição dos sensores de temperatura e pontos de coleta de amostras.....	22
Figura 2.3 – Indicação dos pontos de coleta para o monitoramento do biodigestor	23
Figura 2.4 - Número de animais na granja monitorada e vazão efluente (Set./18 a Ago./19).28	
Figura 2.5: Monitoramento de DQO afluente e efluente e de sólidos voláteis afluente aos biodigestores (Set./18 a Ago./19).	29
Figura 2.6 – Variação dos valores de DQO (a) e Sólidos Voláteis (b) afluente e efluente aos biodigestores monitorados durante o período quente (Out./18 a Mar./19) e frio (Set./18 e Abr. a Ago. /19).....	30
Figura 2.7: Percentual de CH ₄ no biogás e temperatura da biomassa residente no biodigestor, estudo para o período de Set./18 a Ago./19.	30
Figura 2.8 – Variações dos percentuais de CH ₄ no biogás (a) e da temperatura da biomassa residente (b) nos biodigestores, no período quente (Out./18 a Mar./19) e frio (Set./18 e Abr. a Ago. /19).....	31
Figura 2.9 – Variações das estimativas da produção de metano (CH ₄) para os modelos avaliados e da produção advinda da granja monitorada (P _{real}) (Período de Set./18 a Ago./19).	33
Figura 2.10: Variações das produções volumétricas diárias de metano (CH ₄) para os modelos avaliados e da granja monitorada, considerando o período quente (Out./18 a Mar./19) e frio (Set./18 e Abr. a Ago. /19).....	36
Figura 2.11 – Variações das estimativas diárias de metano (CH ₄) pelos modelos Conversão de DQO, e CETESB, antes e depois dos ajustes, frente a produção monitorada (P _{real})	39
Figura 2.12 – Variações das estimativas diárias de metano (CH ₄) pelos modelos do balanço de massa e do IPCC, avaliados antes (modelo original) e depois dos ajustes, e produção de metano verificada na granja monitorada, no período quente (Out./18 a Mar./19) e frio (Set./18 e Abr. a Ago. /19).....	41
Figura 3.1 - Croqui da granja suinícola com sistema de tratamento de efluentes, com a indicação dos locais de instalação dos sensores das temperaturas externas e internas aos biodigestores.....	51
Figura 3.2: Desenho do biodigestor lagoa coberta, com suas respectivas dimensões.....	54
Figura 3.3 – Geometria e configuração interna do biodigestor modelo lagoa coberta (a) única zona térmica (b) zona térmica composta (biogás e biomassa residente).	55
Figura 3.4– Variação das temperaturas ambiente, a partir de médias horárias, para dados monitorados e simulados (zona única e duas zonas) nos períodos do verão (a) e inverno (b). 58	
Figura 3.5 – Variação das temperaturas do solo a partir de médias horárias, para dados observados e simulados (zona única e duas zonas) nos períodos do verão (a) e inverno (b)...59	

Figura 3.6 – Variação das temperaturas da biomassa residente, a partir de médias horárias, para dados observados e simulados (zona única e duas zonas) nos períodos do verão (a) e inverno (b).	61
Figura 3.7– Variação das temperaturas do biogás, a partir de médias horárias, para dados observados e simulados (zona única e duas zonas) nos períodos do verão (a) e inverno (b)...62	62
Figura 3.8 – Médias horárias das temperatura ambiente e do biogás, assim como os ganhos energéticos por radiação, condução e convecção na zona térmica superior (biogás) em biodigestor BLC nos períodos do verão (a) e do inverno (b).	65
Figura 3.9 – Médias horárias das temperaturas do solo e da biomassa residente, assim como os ganhos energéticos por condução e radiação, na zona térmica inferior (biomassa residente), em biodigestor BLC nos períodos do verão (a) e inverno (b).	67
Figura 3.10 – Representação das trocas térmicas, por meio de sob a influência de duas zonas térmicas no biodigestor lagoa coberta, no período de verão (a) e inverno (b)	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Descrição das análises para o monitoramento dos biodigestores.	22
Tabela 2. 2 – Equações de equivalência entre o potencial de biogás e energia elétrica.....	24
Tabela 2.3 – Caracterização dos modelos matemáticos selecionados.....	25
Tabela 2.4 – Memorial de cálculo, para estimativa do potencial de produção de CH ₄	26
Tabela 2.5 - Estatística descritiva dos dados monitorado na granja.....	32
Tabela 2.5 – Ajustes do modelo Conversão de DQO, para estimativa de CH ₄ em biodigestor BLC tratando efluente de suinocultura.....	38
Tabela 2.6 – Ajustes do modelo da CETESB, para estimativa de CH ₄ em biodigestor BLC tratando efluente de suinocultura.....	39
Tabela 2.7 – Análise estatística do resultado de produção de metano (CH ₄) obtida por meio dos modelos matemáticos em comparação com a produção observada na granja (P _{actual}).	42
Tabela 3.1: Propriedade térmofísicas da membrana de PVC.....	54
Tabela 3.2: Propriedades termofísicas do solo adotadas para a modelagem do solo.	55
Tabela 3.3 - Propriedade termofísicas adotadas para a modelagem da biomassa residente e para a superfície de separação entre a zona do biogás e da biomassa residente.....	56
Tabela 3.4 – Descrição dos indicadores de desempenho estudados para temperaturas.	57
Tabela 3.5 – Indicadores de desempenho para diferentes perfis de temperaturas ao se considerar os períodos de verão e inverno e zona térmica única e dupla no interior dos biodigestores.....	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 REFERÊNCIAS	16
2 ESTIMATIVAS DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO EM BIODIGESTORES MODELO LAGOA COBERTA TRATANDO EFLUENTES DE SUINOCULTURA	17
2.1 INTRODUÇÃO.....	17
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.2.1 Caracterização da área de estudo	21
2.2.2 Monitoramento dos biodigestores	21
2.2.4 Descrição dos modelos matemáticos avaliados	24
2.2.5 Proposição de ajuste de modelos	26
2.2.6 Avaliação dos resultados	27
2.3 CONCLUSÕES.....	43
2.4 REFERÊNCIAS	44
3 TROCAS TÉRMICAS EM BIODIGESTORES MODELO LAGOA COBERTA SOB DIFERENTES MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	49
3.1 INTRODUÇÃO.....	49
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	51
3.2.1 Descrição do sistema monitorado	51
3.2.2 Premissas para o estudo das trocas térmicas nos biodigestores	52
3.2.2.1 Modelagem da geometria do Biodigestor	53
3.2.2.2 Modelagem do solo	55
3.2.2.3 Modelagem da massa interna	56
3.2.3 Análise e validação dos modelos	56
3.2.4 Balanço energético	57
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
3.3.1 Comparação das temperaturas simuladas e medidas nos biodigestores.....	57
3.3.2 Balanço energético do modelo com duas zonas térmicas	64
3.3.2.1 Balanço energético do modelo com duas zonas térmicas	64
3.4 CONCLUSÕES.....	71
3.5 REFERÊNCIAS	72
4 CONCLUSÃO GERAL	75

4.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
---	----

1 INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por energia e a preocupação com a gestão de resíduos, tem incentivado o tratamento e aproveitamento de resíduos com alto teor de água e concentração de matéria orgânica para a produção de biogás (ARIAS et al., 2019; MIRTSOU-XANTHOPOULOU; SKIADAS; GAVALA, 2019). Resíduos de atividade de produção animal, como os da suinocultura, podem ser empregados como matéria prima em plantas de biogás, gerando energia e minimizando danos ambientais.

No Brasil, a suinocultura é uma das principais atividades econômicas, visto que o país ocupa a quarta posição no mercado mundial de produção e exportação de carne suína (USDA, 2020). Essa atividade gera grandes volumes de dejetos, que são um problema ambiental. Contudo, tais dejetos, por meio de tecnologias de biodigestão anaeróbia podem ser aproveitados na geração de energia.

Entre as tecnologias de biodigestão anaeróbia, os biodigestores têm sido amplamente empregados em propriedades suinícolas, pois, além de minimizar problemas sanitários e de poluição ambiental, permitem a geração de biogás (SOUZA OLIVEIRA, 2017). Atualmente, o biodigestor modelo lagoa coberta (BLC) ou *plug-flow* é o mais aplicado no Brasil (FERNANDES FILHO; SANTANA; GATTAMORTA, 2018), reconhecido por apresentar simplicidade de instalação e menor custo de investimento, em comparação com outros modelos.

Entretanto, a produção de biogás depende de diversos fatores a começar pela produção de dejetos, que pode variar com o número, idade, alimentação, equipamentos e manejo da limpeza adotado. Outros fatores podem influenciar a quantidade e composição do biogás, como o tempo de retenção hidráulica, o teor de matéria orgânica nos dejetos, temperatura e outras condições favoráveis à comunidade microbiana (FERNANDES FILHO; SANTANA; GATTAMORTA, 2018). A formação de metano pode ocorrer em uma ampla faixa de temperatura, entretanto o nível ótimo seria dentro da faixa mesófila (20 a 40 °C), especialmente entre 30 e 35°C (CHERNICHARO, 2016). De modo geral, temperaturas mais elevadas são desejadas para a produção de biogás, no Brasil, os biodigestores funcionam na faixa mesófila, sem necessidade de aquecimento.

Embora bastante difundido, há muitas falhas nos projetos de implementação desses biodigestores (SOUZA OLIVEIRA, 2017). Entre as falhas podem ser citadas a sub ou superestimação do potencial de biogás, e a falta de conhecimentos técnicos, como o desconhecimento dos fluxos energéticos que ocorrem nos biodigestores. Ainda é um desafio

possuir dados de monitoramento de plantas de biogás em escala plena, que contemplem a caracterização dos efluentes, e ao mesmo tempo, as temperaturas internas e externas aos biodigestores. O domínio das trocas térmicas nos biodigestores permite entender como é o comportamento dos fatores externos que podem influenciar no processo de digestão, e o refinamento de modelos matemáticos facilitaria estimativas mais precisas da produção de biogás. Neste estudo propôs-se a avaliação e o aprimoramento de estimativas de produção de biogás e de modelos de simulação das temperaturas e trocas térmicas em biodigestores modelo lagoa coberta, para auxílio na projeção de biodigestores.

Este trabalho foi organizado em quatro capítulos. Neste presente capítulo foi apresentado a contextualização do assunto e os objetivos geral e específicos. O segundo e terceiro capítulo foram estruturados na forma de artigo. O segundo capítulo teve como proposta apresentar e fornecer recomendações de modelos matemáticos para a estimativa de metano em biodigestores modelo lagoa coberta. O terceiro capítulo por sua vez tratou da modelagem de simulações das temperaturas externas e internas em biodigestores, assim como o balanço de transferência de calor. No último capítulo foi apresentada a conclusão geral e as recomendações para trabalhos futuros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a modelagem em termos de produção de metano e de balanço energético em biodigestores modelo lagoa coberta.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Comparar e avaliar diferentes modelos matemáticos, em termos da produção de metano em biodigestores lagoa coberta tratando efluentes de suinocultura;
- ✓ Propor ajustes de modelos matemáticos para obtenção de melhores resultados de indicadores estatísticos de desempenho na produção de metano;
- ✓ Comparar dois modelos distintos de simulação de trocas térmicas em biodigestor modelo lagoa coberta;
- ✓ Avaliar balanços energéticos em biodigestores modelo lagoa coberta.

1.3 REFERÊNCIAS

ARIAS, J. G. et al. Integrating Anaerobic Digestion of Pig Slurry and Thermal Valorisation of Biomass. **Waste and Biomass Valorization**, n. 0123456789, p. 1–13, 2019.

CETESB. Manual do usuário do programa de computador Biogás: geração e uso energético - efluentes e resíduo rural - versão 1.0. **Secretaria do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia, CETESB (São Paulo)**, p. 1–61, 2006.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agricultural Wastes**, v. 8, n. 2, p. 65–81, 1983.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores anaeróbios**. 2 ed ampl ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

FERNANDES FILHO, A. C.; SANTANA, C. O. S.; GATTAMORTA, M. A. Utilização de biodigestores para geração de energia elétrica a partir de dejetos de suínos no Brasil. **Inovae**, v. 6, p. 67–84, 2018.

IPCC. Emissions From Livestock and Manure Management. In: AUTORES: HONGMIN DONG (CHINA), JOE MANGINO (USA), AND T. A. M. (CANADA); JERRY L. HATFIELD (USA), DONALD E. JOHNSON (USA), KEITH R. LASSEY (NEW ZEALAND), MAGDA APARECIDA DE LIMA (BRAZIL), AND A. R. (RUSSIAN F. (Eds.). . **IPPC Guidelines for National Greenhous Gas Inventories**. [s.l.] (China), Hongmin Dong, 2006. v. Volume 4p. 10.1-10.87.

MIRTSOU-XANTHOPOULOU, C.; SKIADAS, I. V.; GAVALA, H. N. On the effect of aqueous ammonia soaking pre-treatment on continuous anaerobic digestion of digested swine manure fibers. **Molecules**, v. 24, n. 13, 2019.

SOUZA OLIVEIRA, J. C. From transport and storage to control of the process: the challenge of biodigestion from drawings of swine in agroindustrial scale. **Independent Journal of Management & Production**, v. 8, n. 5, p. 747–766, 2017.

USDA. **Market and Trade Data: Meat and Poultry**. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/topCountriesByCommodity#chart28>>.

2 ESTIMATIVAS DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO EM BIODIGESTORES MODELO LAGOA COBERTA TRATANDO EFLUENTES DE SUINOCULTURA

2.1 INTRODUÇÃO

A demanda por energia tem aumentado, frente ao crescimento populacional e das atividades industriais. Adicionalmente, a busca por seguridade energética tem incentivado o avanço de tecnologias sustentáveis e renováveis, com ênfase na utilização de biomassa (AL-HAMAMRE et al., 2017; OUMER et al., 2018).

Os resíduos de culturas, processamento florestal, e de origem animal e humana, são matérias primas de baixo custo para a produção de bioenergia e tem baixa emissão de gases de efeito estufa, quando bem manejados (BHATTACHARYA et al., 2016; HANSSEN, 2019). Além disso, possuem alto potencial energético, e especialmente os resíduos de origem animal e humana não concorrem com demandas alimentares, propiciando assim, benefícios ambientais e econômicos (ANAWAR; STREZOV, 2018; VOLOSHIN et al., 2016).

A utilização de efluentes da criação intensiva de suínos como fonte biomassa, pelo aproveitamento do biogás com fins energéticos, tem sido uma promissora fonte de energia. A atividade de criação suinícola é uma importante atividade econômica para o Brasil, sendo que o país ocupa o quarto lugar como maior produtor e exportador mundial de carne suína (USDA, 2020). De forma geral, a atividade gera grandes volumes de efluente, concentrada em áreas que apresentam esta aptidão econômica. Estima-se a geração média *per capita* diária de 2,35 kg de esterco e 8,60 L de efluente (dejetos líquidos) (OLIVEIRA, 1993). Alternativas para a utilização desse tipo de biomassa é uma forma inteligente e ecológica de enfrentar os desafios trazidos por essa atividade (OLIVEIRA, 2016).

No Brasil, o biodigestor de escoamento tubular, também conhecido como canadense ou modelo lagoa coberta (BLC) é uma das tecnologias mais empregada para tratamento de efluentes de criações de animais via digestão anaeróbia, devido ao seu menor custo de implantação e operação (FERNANDES, 2016). Este tipo de reator biológico tem sido implantado com o objetivo principal de tratamento, pelas vantagens da biodigestão anaeróbia, como minimização de áreas, satisfatória remoção de material orgânico suspenso e solúvel. Em adição, a recuperação de energia pela produção de metano, gás com elevado poder calorífico, tem atraído a atenção dos empreendedores do setor (BEYENE et al., 2012; BRUNO; OLIVEIRA, 2008; SILVA et al., 2018).

Entretanto, o desconhecimento dos mecanismos e rotas de conversão do material orgânico em biometano dificultam o conhecimento e a divulgação dessas tecnologias (SILVA, 2017). Além do mais, alguns autores apontam divergência entre a produções de metano teórica e real observadas nas plantas de escala plena (BILOTTA; ROSS, 2016; KERKHOFF et al., 2015). O emprego de modelos matemáticos é uma relevante ferramenta para a quantificação da produção de biogás nos biodigestores. Na literatura existem diversos modelos empregados para a estimativa da produção de biogás, em especial em reatores UASB tratando esgoto doméstico, os quais possuem modelos consolidados, baseados no balanço de massa nos reatores (DONOSO-BRAVO et al., 2013; LOBATO; CHERNICHARO; SOUZA, 2012; ROSA et al., 2016).

A quantificação da produção de biogás em biodigestores modelo lagoa coberta tratando efluentes agroindustriais fazendo uso diferentes modelos matemáticos, em especial, em unidades escala plena, ainda é limitada. De modo geral, os trabalhos com dejetos suinícolas optam por algum modelo de estimativa, para avaliar a viabilidade e dimensionamento de plantas de tratamento com recuperação de energia (EUSTAQUIO JUNIOR et al., 2014; GONZAGA; BARBOSA, 2016), fazendo uso geralmente de coeficientes e demais dados de entrada já sugeridos ou indicados pelos autores que propuseram os modelos, sem permitir adaptações ou o emprego de coeficientes mais apropriados às diferentes condições operacionais.

Mito et al. (2018) ao avaliar diversos modelos matemáticos, com uma extensa revisão de parâmetros de entrada, para estimar a produção de biogás, compararam os resultados dos modelos com uma medição direta de uma granja. O trabalho teve como foco o detalhamento dos modelos e levantamento de parâmetros de entrada por meio de revisão de literatura, portanto não apresentaram detalhamentos sobre o monitoramento da granja selecionada para avaliação das metodologias, como a caracterização de efluentes e biogás. Além do mais, como resultado apresentaram apenas um valor médio para cada modelo de produção de biogás ao longo do período monitorado de oito meses, sem apresentar as variações sazonais dentro da granja e a confiabilidade desses modelos por parâmetros estatísticos.

A escolha de modelos para estimativa de biogás é dependente dos dados de monitoramento disponíveis em granjas suinícolas, ou que podem ser facilmente adquiridos. De forma geral, os modelos empregados para a estimativa da produção de biogás em sistemas anaeróbios levam em consideração a temperatura do interior dos biodigestores, número de animais, sólidos voláteis, demanda química de oxigênio (DQO), vazão afluente e o tempo de retenção hidráulica (TRH) (CETESB, 2006; CHEN, 1983; CHERNICHARO, 2016).

Dentre os dados de entrada, o teor de sólidos voláteis, para a estimativa de biogás, está fortemente associado à produção do mesmo (MITO et al., 2018). No entanto, a quantidade de sólidos voláteis no carregamento dos biodigestores deve ser limitada, a depender da eficiência esperada para o biodigestor (COMASTRI FILHO, 1981).

A estimativa de biogás pode ser ainda determinada pelo balanço de DQO, em que a matéria orgânica dos dejetos é absorvida e convertida em biogás pelo grupo das arqueias metanogênicas em condições anaeróbias (NETO; SILVA; PINHEIRO, 2017).

As concentrações, tanto de sólidos voláteis como de DQO, são dependentes do número de animais e vazão dos efluentes, que pode variar de acordo o manejo das granjas. Todavia, outros parâmetros físico-químicos adicionais interferem na produção de biogás, como a temperatura e o tempo de retenção hidráulica (TRH).

Em reatores anaeróbios, maiores TRH são favoráveis à degradação dos compostos voláteis pela comunidade metanogênica, proporcionando maior rendimento de metano (MANSER; MIHELICIC; ERGAS, 2015). Do mesmo modo, temperaturas mais elevadas são favoráveis à produção de biogás, especialmente as temperaturas da faixa mesofílica (entre 20 °C e 40°C). Essa faixa é mais indicada para digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, visto que a comunidade microbiana metanogênica mesofílica é menos sensível às variações operacionais, e apresentam um bom desenvolvimento (LIU et al., 2018).

Dentre os modelos matemáticos empregados para prever a produção de biogás em biodigestores anaeróbios estão o modelo de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983), CETESB (2006), Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016), IPCC (2006). Entretanto, parte desses modelos requer grande número de constantes e coeficientes, o que dificulta a operação e projetos de biodigestores, dando prioridade para utilização de modelos simplificados (YANG et al., 2016).

No Brasil, pesquisas referentes à produção de biogás, especialmente em biodigestores modelo lagoa coberta, ainda apresentam diversas limitações como a utilização de parâmetros e coeficientes não adequados à realidade local ou às condições climáticas, obtidos muitas vezes em condições laboratoriais. Outra limitação do emprego dos modelos matemáticos está relacionada à inconsistência, por vezes, de banco de dados que contenham informações coerentes e adaptadas ao tipo de resíduos e substratos, que possibilite o auxílio e avanço nestas pesquisas (OLIVEIRA, 2018). Em adição, o aprimoramento e ajustes nos modelos já utilizados podem conferir maior precisão e confiabilidade nos resultados. Assim, este trabalho teve-se como objetivo avaliar, comparar e propor ajustes em diferentes modelos matemáticos

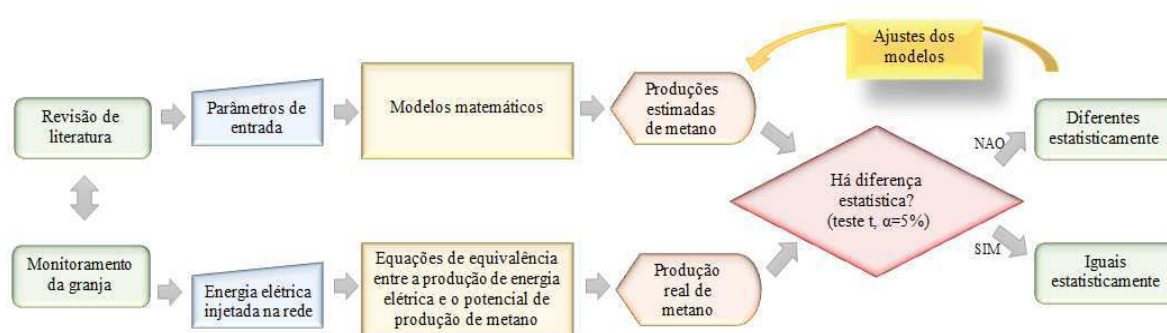
utilizados para estimar a produção de metano, a partir do monitoramento de biodigestores modelo lagoa coberta tratando efluentes de suinocultura.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Com o intuito de estimar a produção de biogás nos biodigestores BLC a partir do tratamento de efluente de suinocultura foi realizada uma ampla revisão de literatura das principais metodologias empregadas para tal fim, em sistemas anaeróbios de tratamento de efluentes.

Para este estudo, foram selecionados os modelos de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983), CETESB (2006), Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016) e IPCC (2006). A Figura 2.1 apresenta um fluxograma esquemático indicando as etapas do estudo.

Figura 2.1 – Fluxograma com as etapas metodológicas do estudo



O modelo de Chen-Hashimoto é reconhecido como um dos modelos mais confiáveis para estimativa de biogás, o da CETESB é um modelo bastante utilizado por sua simplicidade, e o de Conversão de DQO é comumente utilizado para estimativa de biogás em reatores anaeróbios instalados em estações de tratamento de esgoto. Em adição, o modelo do IPCC apesar de ter sido proposto inicialmente para estimar o potencial de emissões de gases de efeito estufa, tem sido amplamente aplicado para estimar o potencial de produção de biogás em biodigestores.

Os dados de entrada foram obtidos em uma granja suinícola que realiza a recuperação do biogás e a geração de eletricidade em um motogerador, os demais dados de coeficientes e parâmetros foram considerados os indicados nos modelos. A avaliação dos modelos foi realizada em termos da comparação da produção volumétrica média mensal de metano das quatro metodologias propostas com o dado real obtido na granja monitorada (P_{real}),

determinado a partir da produção de energia elétrica e sua conversão em valores equivalente de produção de metano.

2.2.1 Caracterização da área de estudo

Para a estimativa da produção de biogás e comparação dos modelos matemáticos propostos realizou-se o monitoramento de uma suinocultura no município de Teixeiras, localizado na Zona da Mata de Minas Gerais (Brasil), no período de setembro de 2018 a agosto de 2019. O clima dessa região é do tipo Cwa, mesotérmico, com duas estações bem definidas durante o ano: verão quente e chuvoso (outubro a março) e inverno frio e seco (abril a setembro) (BOTREL; ALVIM, 1997). A granja operou em ciclo completo, com número total de animais variando entre 10.280 e 12.519 cabeças.

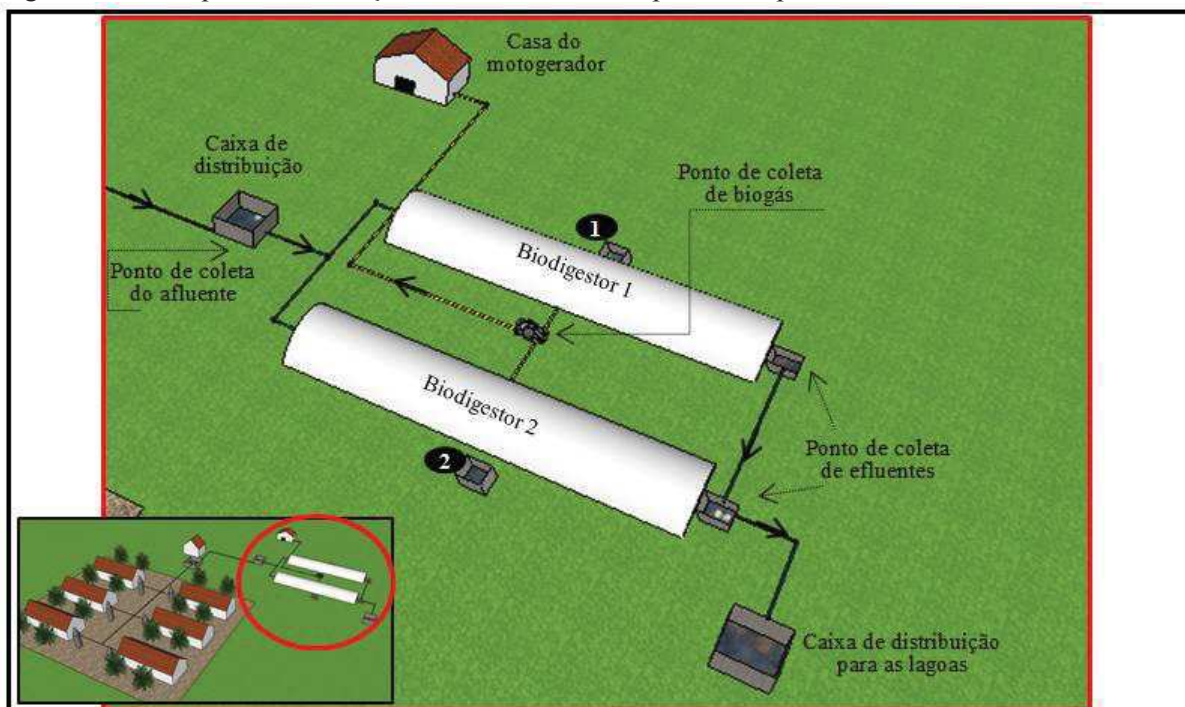
Na unidade monitorada, o efluente proveniente das descargas da lâmina d'água ao longo do piso das instalações de crescimento e engorda ("piscinas"), das lavagens das baias e provenientes dos bebedouros dos suínos é canalizado para um tanque de equalização. Na sequência, o efluente é bombeado para dois biodigestores em paralelo, modelo lagoa coberta, com capacidade de 1.250 m³ cada um. Após o tratamento anaeróbio, o efluente é direcionado para lagoas de estabilização, e posteriormente aplicado em áreas de pastagens na própria propriedade.

O biogás produzido é retido nas próprias campânulas dos biodigestores, de onde é direcionado para uma coluna de adsorção, e posteriormente, convertido em energia elétrica por meio de um motogerador com 120 kVA, modelo GMWM120. A energia produzida é injetada na rede de distribuição da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), e registrada em um medidor do padrão de energia, para posterior compensação de eletricidade da unidade produtora.

2.2.2 Monitoramento dos biodigestores

O monitoramento do sistema de tratamento foi realizado no período de setembro de 2018 a agosto de 2019, em termos de temperatura interna do BLC (biomassa), qualidade do efluente (sólidos voláteis e DQO) e composição de metano no biogás. Na Figura 2.2 é apresentado um esquema ilustrativo dos pontos de coleta.

Figura 2.2 – Croqui da distribuição dos sensores de temperatura e pontos de coleta de amostras.



1 e 2: Locais de instalação dos sensores de temperatura da biomassa residente.

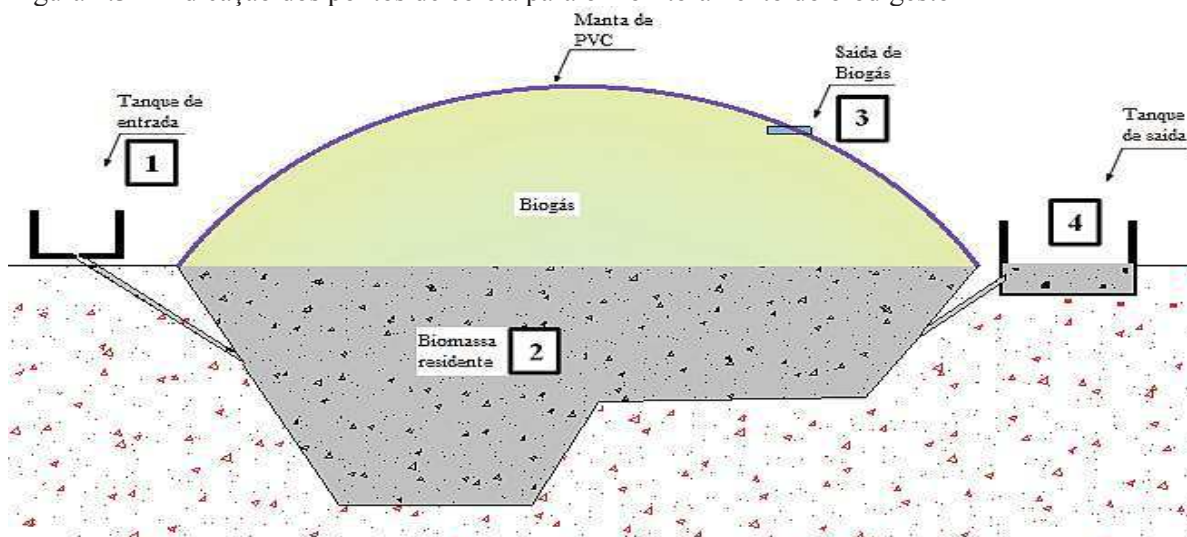
Na propriedade foram instalados sensores para o monitoramento de temperaturas externas e internas aos biodigestores (Figura 2.2), os dados coletados são conectados a um *datalogger*, que por meio de telemetria envia os dados de forma contínua e em tempo real, a uma central de monitoramento, instalada no Centro de Conhecimento em Bioenergia da Universidade Federal de Viçosa - UFV. Os dados são registrados em um sistema de gerenciamento de dados (MySQL), em uma frequência de 30 segundos. Esses dados passam por um tratamento, no intuito de remover erros de transmissão e demais inconsistências que possam ocorrer, sendo depois armazenados em um banco de dados. O detalhamento dos locais de instalação dos sensores e locais de coleta de amostras de biogás e efluentes pertinentes ao monitoramento pode ser visto na Tabela 2.1 e na Figura 2.3.

Tabela 2.1 – Descrição das análises para o monitoramento dos biodigestores.

Ponto	Descrição	Análises
1	Entrada (afluente)	DQO, sólidos voláteis
2	Biomassa residente	Temperatura ¹
3	Amostragem de biogás	Composição do biogás
4	Saída (efluente)	DQO

¹Determinação em tempo real

Figura 2.3 – Indicação dos pontos de coleta para o monitoramento do biodigestor



A coleta das amostras na entrada e saída dos BLC foram realizadas semanalmente, de forma pontual no afluente que alimenta os dois biodigestores, e o efluente coletado pontualmente na saída de cada biodigestor. As metodologias analíticas seguiram a indicação de APHA (2017). A determinação da composição de metano no biogás foi realizada a partir de coletas semanais do biogás na saída do sistema de purificação realizadas pelo uso de *bags* (10L) sendo as análises realizadas em um analisador de gás (Online Infrared Gas Analyzer, modelo Gasboard, nº 3100). Para a aplicação dos modelos matemáticos foram utilizados médias dos dados de temperatura, DQO, e sólidos voláteis dos dois biodigestores monitorados; médias mensais das temperaturas da biomassa residente nos biodigestores e do percentual de metano no biogás.

A quantificação do número de suínos, no período em estudo foi informada pelos proprietários da granja. A vazão de efluentes foi estimada com base no consumo mensal de água mensurado em hidrômetros instalados na granja, considerando-se um coeficiente de retorno de 0,65 de acordo com recomendação de Souza et al. (2016) para sistemas suínolas de ciclo completo. O tempo de retenção hidráulica (TRH) dos BLC foi determinado a partir da vazão de efluentes e o volume dos digestores.

2.2.3 Produção volumétrica real de metano observada na granja suinícola

A produção volumétrica diária de metano observada na granja (Equação 1) foi utilizada como dado comparativo na avaliação dos modelos estudados, para tanto, fez-se uso de uma equivalência entre a energia elétrica gerada no sistema motogerador e a produção de

biogás, conforme detalhado na Tabela 2.2. As contas de energia elétrica da suinocultura, no período em estudo, foram avaliadas em termos da geração de energia elétrica inserida na rede.

Tabela 2. 2 – Equações de equivalência entre o potencial de biogás e energia elétrica

Equação	Observações
(1) $PTB = \frac{P}{PCI_d \times Ef \times \%} \times 24$	PTB = produção total de metano ($m^3 CH_4 d^{-1}$); P = potência elétrica disponibilizada (kW); PCI _d = potencial calorífico inferior disponível (kWh m ⁻³); Ef= eficiência global de máquinas térmicas (0,25); % = percentual de metano no biogás; 24= fator de conversão h d ⁻¹ ;
(2) $P = \frac{E}{m \times 24}$	P = potência elétrica disponibilizada (kW); E = energia elétrica total gerada pelo biogás, obtidas das contas de energia elétrica (kWh mês ⁻¹); m = dias no mês; 24 = horas no dia (motor gerador contínuo); PCI _d = potencial calorífico inferior disponível (kWh m ⁻³); PE = peso específico em kg Nm ⁻³ (adotaram-se valores interpolados de acordo o percentual de CH ₄ : 40% - 1,4643; 60% - 1,214; 65% - 1,1518; 75% - 1,0268; 95% - 0,7768) ¹ ;
(3) $PCI_d = PE \times PCI \times \frac{4,19}{3600}$	PCI = potencial calorífico inferior em kcal kg ⁻¹ ; (adotaram-se valores interpolados de acordo o percentual de CH ₄ : 40% - 2.338,52; 60% - 4.229,98; 65% - 4.831,14; 75% - 6.253,01; 95% - 10.469,60) ¹ ; 4,19/3600 = constante de conversão entre kcal para kWh.

Adaptado de Zilotti (2012); ¹ Avelar (2001)

A eficiência global das máquinas térmicas foi determinada a partir da potência gerada, consumo de biogás e do poder calorífico inferior disponível, informações essas, constantes no manual do conjunto motor gerador instalado na granja (ER-BR, 2018). A energia elétrica gerada a partir do biogás (E) e injetada na rede, obtida nas contas da concessionária foi utilizada para calcular a potência elétrica disponibilizada (P) (Equação 2).

2.2.4 Descrição dos modelos matemáticos avaliados

A Tabela 2.3 apresenta uma caracterização geral dos modelos matemáticos avaliados.

Tabela 2.3 – Caracterização dos modelos matemáticos selecionados

	Chen e Hashimoto (CHEN, 1983)	Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016)	CETESB (2006)	IPCC (2006)
Princípio matemático	Cinético	Balanço de massa	Conversão de energia consumida	Conversão de energia consumida
Origem do Efluente	Suínos	Esgoto doméstico	Suínos, bovinos, equinos, aves e esgoto urbano	Suínos, búfalos e bovinos
Reator	Biodigestor anaeróbio	(UASB)	-	-
Temperatura	30 – 60 °C	$\geq 15^{\circ}\text{C}$	-	10 - 28 °C (temperatura ambiente média anual)
TRH	5-40 d	≥ 4 h	-	-
Concentração orgânica	13-65 kg _{SV} m ⁻³	-	-	-
Carregamento		2,5 - 3,5 kg _{DQO} m ⁻³ d ⁻¹	-	-
Rendimento de metano	de 0,32 a 0,52 m ³ _{CH₄} kg ⁻¹ _{SV}	-	-	0,29 -0,48 m ³ _{CH₄} kg ⁻¹ _{VS} (variável com país ou região)
Produção de sólidos	-	0,11 a 0,23 kg _{DQO} olodo kg _{DQOaplic} ⁻¹	-	-
Concepção/ Aplicabilidade	Experimento laboratorial e piloto	Piloto e escala plena	Inventário de emissões de CH ₄ gerado pela degradação anaeróbia de resíduos no Brasil	Inventário de emissões de CH ₄ gerado pela degradação anaeróbia de resíduos

TRH: tempo de retenção hidráulica; UASB :Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo

Os modelos matemáticos selecionados foram avaliados em termos da produção volumétrica de metano obtida em biodigestores modelo lagoa coberta (BLC) (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Memorial de cálculo, para estimativa do potencial de produção de CH₄

Equação		Observações
Modelo de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983)		
(4)	$B = B_0 \times \left(1 - \frac{K}{\mu m \text{ TRH} - 1 + K}\right)$	B = produção de metano (m ³ _{CH₄} kg ⁻¹ _{SV}); B ₀ = rendimento de metano (0,36 m ³ _{CH₄} kg ⁻¹ _{SV}) ¹ ; K = constante cinética;
(5)	$K = 0,6 + 0,0006e^{(0,1185 \times SV)}$	μm = crescimento específico máximo de microrganismos (d ⁻¹);
(6)	$\mu m = 0,013 T - 0,129$	T = temperatura da biomassa residente (°C); TRH = tempo de retenção hidráulica (d);
(7)	$Q_{CH_4} = B \times Q_{efl} \times SV$	SV = teor de sólidos voláteis no afluente (kg _{SV} m ⁻³). Q _{efl} = vazão de efluentes (m ³ d ⁻¹); Q _{CH₄} = produção de metano (m ³ _{CH₄} d ⁻¹).
Modelo de conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016)		
(8)	$DQO_{CH_4} = Q_{efl} \times (S_0 - S) - Y_{obs} \times Q_{efl} \times S_0$	DQO _{CH₄} = carga de DQO convertida em metano (kgDQO _{CH₄} d ⁻¹); S ₀ = DQO afluente (kg m ⁻³); S = DQO efluente (kg m ⁻³);
(9)	$f(T) = \frac{P \times K_{DQO}}{R \times (273 + T)}$	Q _{efl} = vazão de efluentes (m ³ d ⁻¹); Y _{obs} = coeficiente de produção de sólidos (0,19 kgDQO _{lodo} kg ⁻¹ _{DQO}); f(T) = fator de correção para a temperatura operacional do reator (kgDQO m ⁻³); P = pressão atmosférica (0,92 atm); K _{DQO} = DQO correspondente a um mol de CH ₄ (64 gDQO mol ⁻¹); R = constante dos gases (0,08206 atm.L mol ⁻¹ K); T = temperatura operacional do reator (°C). Q _{CH₄} = produção de metano (m ³ _{CH₄} d ⁻¹);
(10)	$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{f(T)}$	
Modelo da CETESB (2006)		
(11)	$Q_{CH_4} = \frac{1}{VE} \times (Pb \times N \times Mt \times CH_4\%)$	Q _{CH₄} = produção de metano (m ³ _{CH₄} d ⁻¹). VE = volume específico do metano (0,67 kg _{CH₄} m ⁻³ _{CH₄}); Pb = produção de biogás (0,062 kg _{biogás} kg _{Mt} ⁻¹); N = número total de animais; Mt = matéria produzida por animal (2,25 kg _{Mt} d ⁻¹ animal ⁻¹); CH ₄ % = percentual de metano no biogás (%).
Modelo do IPCC (2006)		
(12)	$Q_{CH_4} = N \times \left[SV_{(T)} \times B_{o(T)} \times \frac{MCF}{100} \times MS \right]$	SV _(T) = sólido volátil excretado pelos animais (0,3 kg de matéria seca animal ⁻¹ d ⁻¹); B _{o(T)} = rendimento de metano (0,29 m ³ _{CH₄} kg ⁻¹ _{SV}); MCF = fatores de conversão de metano para cada sistema de manejo de dejetos S por região climática k (79%); MS = fração do esterco de animais com sistema de manejo de esterco S em região climática k, adimensional (1). N = número total de animais; Q _{CH₄} = produção de metano (m ³ _{CH₄} d ⁻¹).

¹ 0,36 m³_{CH₄} kg⁻¹_{SV} a 25 °C (CHAE et al., 2008)

2.2.5 Proposição de ajuste de modelos

Após uma avaliação preliminar dos resultados dos modelos foi proposto ajustes, de forma a buscar adaptações em seus parâmetros de entrada, a partir das premissas de: (i) buscar dados de entrada mais aplicados e adequados ao tratamento de efluentes de suinocultura; (ii) adaptar os modelos para condições mais coerentes com a realidade brasileira.

2.2.6 Avaliação dos resultados

Os resultados do monitoramento da granja foram avaliados por meio de gráficos temporais, no intuito de apresentar a tendência dos dados ao longo do período de monitoramento (Set./18 a Ago. /19), e por meio de gráficos box-plot. Os dados foram agrupados em dois períodos, a saber: quente (Out./18 a Mar./19) e frio (Set./18 Abr. a Ago. /19), correspondente às duas diferentes condições climáticas definidas na região verão quente e chuvoso (outubro a março) e inverno frio e seco (abril a setembro), conforme definido em Botrel e Alvim (1997), tendo-se como intuito avaliar e discutir os dados a partir das variações sazonais climáticas.

Os resultados dos modelos foram avaliados e comparados com a granja monitorada por meio de gráficos box-plot e por meio de regressão linear simples, passando pela origem, conforme ajuste da Equação 13.

$$Y_i = \beta_1 X_i + e_i \quad (13)$$

Em que Y_i recebe os resultados da produção de metano obtidos pelos modelos e X_i a produção observada na granja, β_1 simboliza a relação entre a produção observada na granja e obtida pelos modelos; e e_i aos erros aleatórios. Nesta análise aplicou-se o teste t, no nível de 5% de probabilidade, e (n-1) graus de liberdade, testando as hipóteses $H_0: \beta_1 = 1$ e $H_1: \beta_1 \neq 1$.

Adicionalmente, foi determinado o coeficiente estatístico BIAS (erro médio) para termos comparativos da precisão de previsão. O BIAS fornece uma ideia da tendência (erro sistemático) do modelo superestimar ou subestimar os valores reais observados, onde o erro sistemático próximo de zero remetem a uma boa simulação (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011).

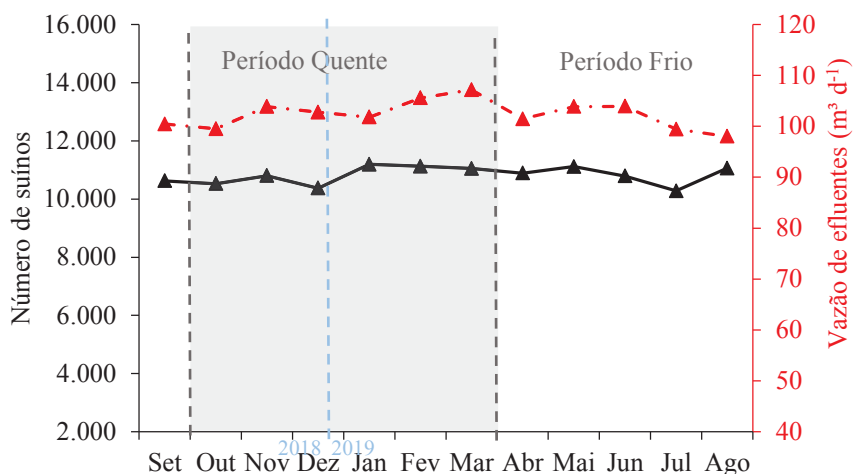
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Monitoramento dos biodigestores e dados de entrada dos modelos

O monitoramento dos biodigestores modelo Lagoa Coberta (BLC) foi realizado para o período de um ano (Set./18 a Ago./19). Durante o período de monitoramento o número de animais variou entre 10.280 e 11.192 cabeças, sendo os valores mínimos observados no mês de julho (período quente) e mês de dezembro (período frio) (Figura 2.4). A vazão de

efluentes teve pequena variação, com média de $102,3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de efluentes (Figura 2.4), e mínima observada no mês de agosto (período frio) e no mês de março (período quente).

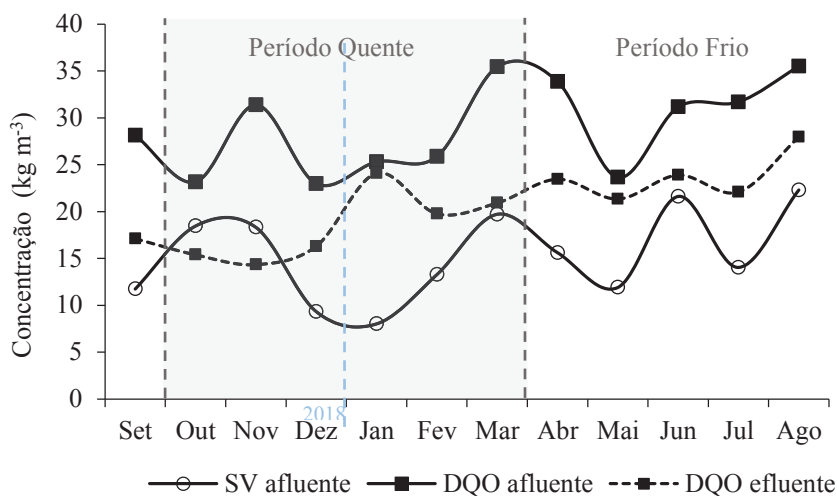
Figura 2.4 - Número de animais na granja monitorada e vazão efluente (Set./18 a Ago./19).



A variação do número de animais na granja é influenciada pela demanda por carne suína, variável durante o ano. A saída de animais pode resultar em maior número de lavagens das baias, as quais podem trazer alterações na vazão real da granja, e consequentemente na diluição dos dejetos.

Quanto ao monitoramento dos biodigestores em termos de DQO, observou-se uma variação afluente ao sistema de tratamento entre $23,0$ e $35,5 \text{ kg m}^{-3}$, os valores de DQO na saída oscilaram entre $14,3$ a $28,0 \text{ kg m}^{-3}$ (Figura 2.5).

Figura 2.5: Monitoramento de DQO afluente e efluente e de sólidos voláteis afluente aos biodigestores (Set./18 a Ago./19).

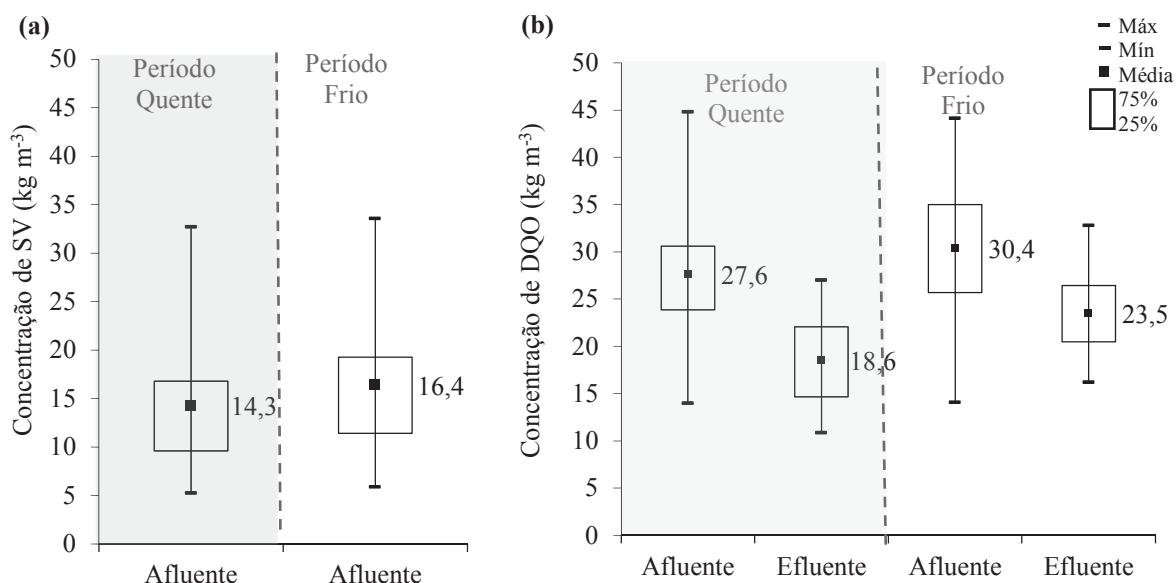


Em estudos avaliando parâmetros físico-químicos em BLC foram encontrados valores similares em comparação com o presente trabalho. Fernandes et al. (2014) em uma granja de terminação de suínos, avaliando biodigestores em série encontrou média afluente de 30 kg m^{-3} e valores na saída do tratamento de $21,6$ e $14,2 \text{ kg m}^{-3}$ para o primeiro e segundo biodigestor, respectivamente. Veloso et al. (2018) ao avaliar o tratamento de efluentes de suinocultura em biodigestores BLC operando em paralelo observou valores afluentes de DQO da ordem de $25,2 \text{ kg m}^{-3}$ e de $5,6 \text{ kg m}^{-3}$ na saída, indicando uma eficiência de remoção superior ao do presente estudo.

Os sólidos voláteis no afluente dos biodigestores durante o período monitorado variaram de $8,0$ (janeiro) a $22,3 \text{ kg m}^{-3}$ (agosto). Veloso et al. (2018) encontraram concentração média de sólidos voláteis de $9,9 \text{ kg m}^{-3}$ no afluente, enquanto que Silva et al. (2015) encontraram média de $18,9 \text{ kg m}^{-3}$, os quais são similares e coerentes com as médias mínimas e máximas mensais observadas na granja monitorada.

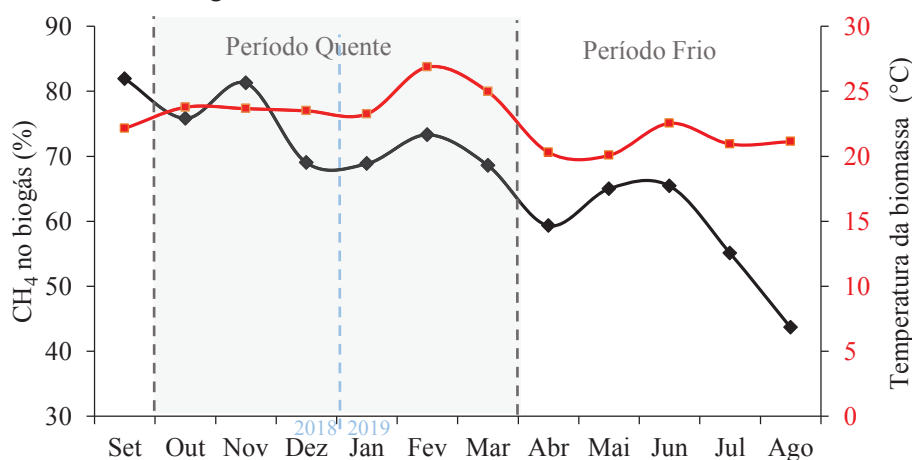
A Figura 2.6 apresenta o gráfico box-plot indicando as variações semanais de DQO e sólidos voláteis para os períodos quente e frio, indicando uma maior concentração de sólidos voláteis no período frio e eficiências médias de remoção de DQO de $32,5 \%$ e $26,2 \%$ para os períodos quente e frio, respectivamente. Sousa (2019) encontrou $40,6 \%$ de remoção para o período do verão e $36,8 \%$ para o inverno.

Figura 2.6 – Variação dos valores de DQO (a) e Sólidos Voláteis (b) afluente e efluente aos biodigestores monitorados durante o período quente (Out./18 a Mar./19) e frio (Set./18 e Abr. a Ago./19)



Na Figura 2.7 apresenta-se a composição de metano no biogás e a temperatura média da biomassa residente no interior dos biodigestores. Como observado, o percentual de metano (CH_4) no biogás teve uma ampla variação (43,6 - 81,9 %) seguindo uma tendência decrescente mais evidente com o início do período frio, o que foi observado com menor intensidade para a temperatura da biomassa residente.

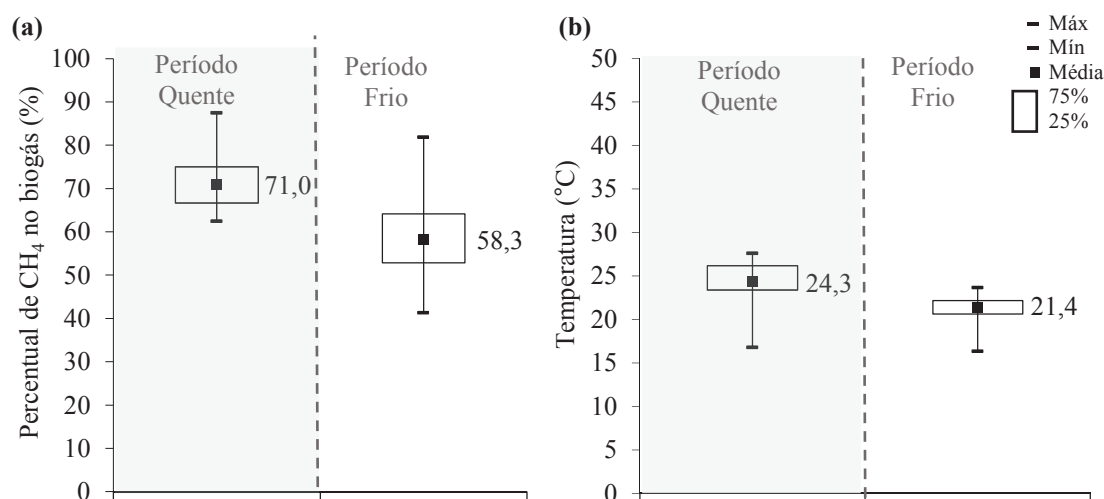
Figura 2.7: Percentual de CH_4 no biogás e temperatura da biomassa residente no biodigestor, estudo para o período de Set./18 a Ago./19.



A Figura 2.8-a indica a variação da composição de metano no biogás para os períodos quente e frio, os valores médios do teor de metano foram de 71,0 e 58,3 %, respectivamente.

Em adição, a temperatura da biomassa residente teve pouca variação devido à inércia térmica do solo e reduzida influência da temperatura ambiente no interior dos biodigestores como já reportado por Hreiz et al. (2017). Os valores de temperatura médios da biomassa residente foram de 24,3 e 21,4 °C, para os períodos quente e frio, respectivamente. Chae et al. (2008) obtiveram percentuais de metano no biogás com a digestão de dejetos suínos da ordem de 65,3, 64,0 e 62,0 % de CH₄ para temperaturas de 35, 30 e 25°C, respectivamente, enquanto que Resende et al. (2016) também observaram pequenas variações no teor de metano no biogás em função da variação da temperatura, para os períodos de verão e inverno as composições foram de 59,2 % e de 53,7 %, respectivamente.

Figura 2.8 – Variações dos percentuais de CH₄ no biogás (a) e da temperatura da biomassa residente (b) nos biodigestores, no período quente (Out./18 a Mar./19) e frio (Set./18 e Abr. a Ago. /19)



A redução nos teores de metano no biogás observada no período frio (Figura 2.7) poderia estar relacionada com outros parâmetros operacionais, além da temperatura. O tempo de retenção hidráulica, o pH e alcalinidade podem afetar a biodigestão anaeróbia e consequentemente influenciar o percentual de metano no biogás (FERREIRA et al., 2017). Biodigestores em escala plena são muito susceptíveis às variações decorrentes ao manejo da granja, as quais repercutem na produção e composição do biogás.

De forma complementar, foi apresentada na Tabela 2.5 a estatística descritiva para dados monitorados na granja, utilizados nos modelos como parâmetros de entrada, no período quente e frio.

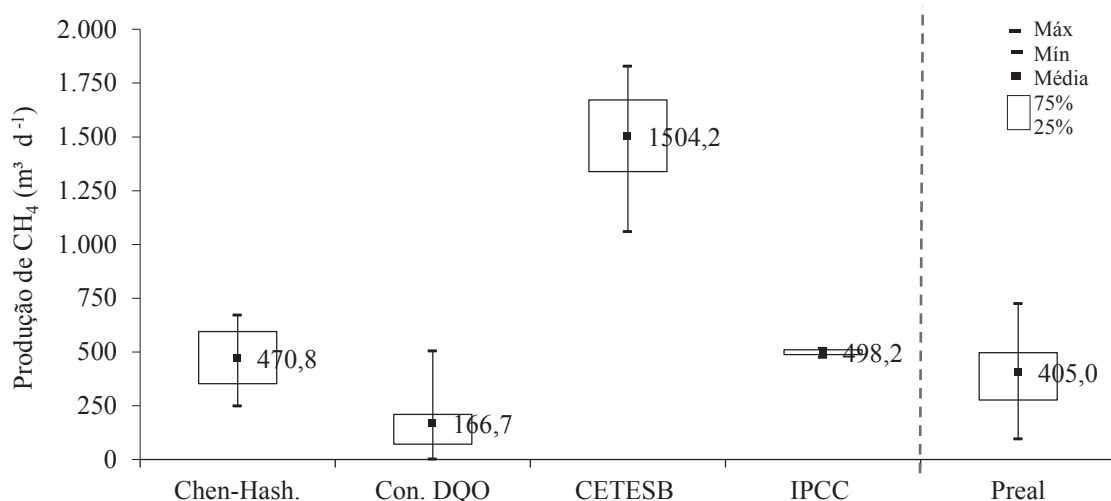
Tabela 2.5 - Estatística descritiva dos dados monitorado na granja

	Número de animais (kg m ⁻³)	SV Afluente (kg m ⁻³)	DQO Afluente Efluente (kg m ⁻³)		Percentual de CH ₄ (%)	Temperatura da biomassa (°C)
Período Quente (Out./18 a Mar./19)						
Média	10.845,0	14,3	27,6	18,6	71,0	24,3
Nº de dados	6,0	21,0	22,0	22,0	16,0	151,0
Mediana	10.926,0	13,4	28,4	18,3	71,7	24,2
Mínimo	10.373,0	5,3	14,0	10,9	62,5	16,8
Máximo	11.192,0	32,7	44,84	27,0	87,5	27,6
Desvio Padrão	337,0	6,8	7,4	5,0	6,2	2,2
Período Frio (Set./18 e Abr. a Ago. /19)						
Média	10.793,0	16,4	30,4	23,5	59,4	21,4
Nº de dados	6,0	20,0	25,0	24,0	17,0	137,0
Mediana	10.841,0	14,7	29,9	22,6	60,2	21,6
Mínimo	10.280,0	5,9	14,1	16,2	41,4	16,4
Máximo	11.114,0	33,6	44,2	32,8	82,5	23,7
Desvio Padrão	308,0	7,8	7,1	4,7	11,1	1,3
Período Completo (Set./18. a Ago. /19)						
Média	10.819,0	15,3	29,1	21,2	65,1	22,9
Nº de dados	12,0	41,0	47,0	46,0	33,0	288,0
Mediana	10.845,0	14,3	29,4	20,8	66,7	22,5
Mínimo	10.280,0	5,3	14,0	10,9	41,4	16,4
Máximo	11.192,0	33,6	44,8	32,8	87,5	27,6
Desvio Padrão	309,0	7,3	7,3	5,4	10,8	2,3

2.3.2 Estimativa da produção de metano e comparação dos modelos

A Figura 2.9 apresenta as variações da produção de metano obtidas por meio dos modelos avaliados, e a produção de metano observada na granja monitorada (P_{real}), a qual teve um valor médio de 405,0 m³ d⁻¹. De forma geral, os resultados médios dos modelos foram discrepantes, com valores variando de 166,7 a 1.504,2 m³ CH₄ d⁻¹.

Figura 2.9 – Variações das estimativas da produção de metano (CH_4) para os modelos avaliados e da produção advinda da granja monitorada (P_{real}) (Período de Set./18 a Ago./19).



Chen-Hash: Chen-Hashimoto (CHEN, 1983); Con. COD: Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016), CETESB: CETESB (2006), IPCC: IPCC (2006)

O modelo de Chen-Hashimoto apresentou resultados interessantes para estimativa de biogás, em biodigestores tratando dejetos de suinocultura, utilizando concentração de sólidos voláteis monitorados, com resultado médio e variação de produção de metano similar ao da granja monitorada (Figura 2.9).

Esse modelo matemático é um dos mais utilizados e que oferece maior confiabilidade de resultados (AIRES et al., 2014; OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006), o qual tem como dados de entrada o teor de sólidos voláteis, tempo de retenção hidráulica e temperatura, reportados na literatura como fatores associados à produção de biogás. Os sólidos voláteis referem-se à parte orgânica que pode ser degradada pela comunidade metanogênica e convertida em biogás, de modo que essa produção de biogás pode ser intensificada ou reduzida, conforme a fração de matéria biodegradável presente nos dejetos (HASAN et al., 2019; MITO et al., 2018).

Do mesmo modo, o TRH provoca impactos na atividade microbiana anaeróbia, sendo que maiores TRH são favoráveis à degradação dos compostos voláteis, resultando em maior rendimento de metano (MANSER; MIHELICIC; ERGAS, 2015). Outro parâmetro de entrada em alguns modelos é o rendimento de biogás (B_0), o qual pode apresentar valores diferentes, dependentes da variação do manejo da granja, diferenciação de alimentação e de uso de água (AMARAL et al., 2016). No que concerne à temperatura, valores mais elevados tendem a melhorar a eficiência do biodigestão, possibilitando menor tempo de retenção hidráulica e maiores produções de metano (HAGOS et al., 2017; HASSANEIN et al., 2015).

De acordo com Oliveira (2006), o modelo de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983) pondera como pertinentes o número de dados de entrada para a estimativa da produção de biogás, os quais ainda são facilmente obtidos. Mito et al. (2018) ao avaliarem modelos matemáticos para estimar a produção de biogás, apresentaram como resultados apenas um valor médio de produção de biogás obtida em cada modelo e na granja observada, ao longo de um período de oito meses. As variações sazonais de produção de biogás, e de número de animais dentro da granja não foram apresentadas. Os autores apresentaram apenas o valor médio do número de animais, e os demais dados, como a caracterização dos efluentes e o percentual de metano, ficaram limitados a parâmetros obtidos na revisão de literatura. O trabalho teve como foco o detalhamento dos modelos e levantamento de parâmetros de entrada por meio de revisão de literatura, de modo que os próprios autores ressaltaram que outras tecnologias e técnicas de manejos diferentes da granja em questão afetam a confiabilidade dos resultados, necessitando de avaliação caso a caso.

Ainda de acordo com Mito et al. (2018), o modelo de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983) foi o que apresentou resultados mais discrepantes, o que pode estar relacionado com o uso de um valor tabulado para o teor de sólidos voláteis utilizado para dejetos, o qual é adotado independentemente da idade dos animais. Entretanto aos autores definirem outros valores para a concentração de sólidos e para o rendimento final de metano (B_0) encontraram valores muito similar de produção de biogás ao valor médio obtido no caso da granja utilizado para verificação dos modelos. Tal fato corrobora para a importância da aplicação de modelos com parâmetros de entrada advindos do monitoramento de granjas suínolas. Além do mais, as pesquisas com modelos matemáticos para estimativa de biogás quando buscam um maior detalhamento de dados de entrada passíveis de serem facilmente adquiridos, possibilitam uma melhor recomendação de coeficientes disponíveis na literatura, provindos em estudos em nível de experimentos laboratoriais.

Ademais os modelos de Chen-Hashimoto consistem em duas equações para estimativa do biogás, sendo que a primeira fornece resultado expresso em m^3 de $\text{CH}_4 \text{ kg}^{-1}$ de SV adicionado no biodigestor, e a segunda equação é expressa em m^3 de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-3}$ do volume do biodigestor d^{-1} . Observa-se a preferência em diversos trabalhos em estimar a produção de biogás expressa em m^3 de $\text{CH}_4 \text{ m}^{-3}$ do volume do biodigestor d^{-1} (MITO et al., 2018; PHAM; TRIOLO; SOMMER, 2014; YANG et al., 2016). Entretanto, Chen (1983) complementa que em termos de projetos de biodigestor, a primeira equação, a qual foi utilizada no presente trabalho, seria mais recomendada para estimar a vazão de biogás.

Todavia, a produção de metano também pode ser associada à remoção de DQO, já que a remoção de DQO é uma das formas de identificar a fração orgânica que está sendo degradada nos reatores. Nesse sentido, o modelo do balanço de massa resultou em estimava de produção de $166,7 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ d}^{-1}$.

O modelo de Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016), o qual é um estudo das parcelas de toda a matéria que entra, sai e se acumula no sistema, apresenta algumas limitações que podem comprometer a estimativa da produção de metano, a saber: (i) flutuação da vazão; (ii) variação da DQO afluyente; (iii) quantificação da produção de lodo; e (iv) perdas de metano por vazamento e na forma dissolvida no efluente. Em avaliações de das rotas de DQO em reatores UASB piloto, já foram quantificadas perdas de metano dissolvido no efluente de esgoto sanitário de até 41% de sua produção total (SOUZA; CHERNICHARO; AQUINO, 2011). Maiores estudos das rotas de conversão de matéria orgânica em biodigestores BLC devem ser realizados a fim de quantificar e considerar mais parcelas no balanço de massa, assim como a DQO convertida em metano e perdido dissolvido no efluente e a DQO utilizada na redução de sulfato. Acredita-se que este estudo mais pormenorizado favoreça a obtenção de resultados de produção volumétrica de metano mais coerentes com dados monitorados.

Enquanto os modelos de Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016) e de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983) consideram a rota de conversão de matéria orgânica no sistema e aspectos cinéticos, o modelo proposto pela CETESB (2006) é mais simples e tem como principal variável de entrada o número de animais. De acordo com a Figura 2.9 a produção de metano estimada foi da ordem de $1.504,2 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ d}^{-1}$, o qual foi o mais discrepante dentre os modelos comparados.

O modelo da CETESB considera coeficientes de produção de biogás a partir da produção de dejetos por animal, e não considera parâmetros operacionais nos biodigestores, como temperatura e tempo de retenção hidráulica. O coeficiente de biogás sugerido na metodologia da CETESB (2006) é de $0,062 \text{ kg de biogás kg}^{-1} \text{ esterco}$ (MOTTA, 1986), o qual é recorrentemente utilizado em estimativas de biogás (COLUNA, 2016; SANTOS; NARDIR JUNIOR, 2013). Esse valor pode ser influenciado especialmente pela temperatura e TRH e, portanto, variar conforme interações do tempo e manejo (SOUZA et al., 2005). Todavia, esse modelo não é sensível às variações da carga orgânica no efluente, visto que não considera a alimentação por matéria orgânica e sólidos, e nem a eficiência de remoção destes, os quais estão ligados com a degradabilidade do efluente. Além do mais, os coeficientes de produção

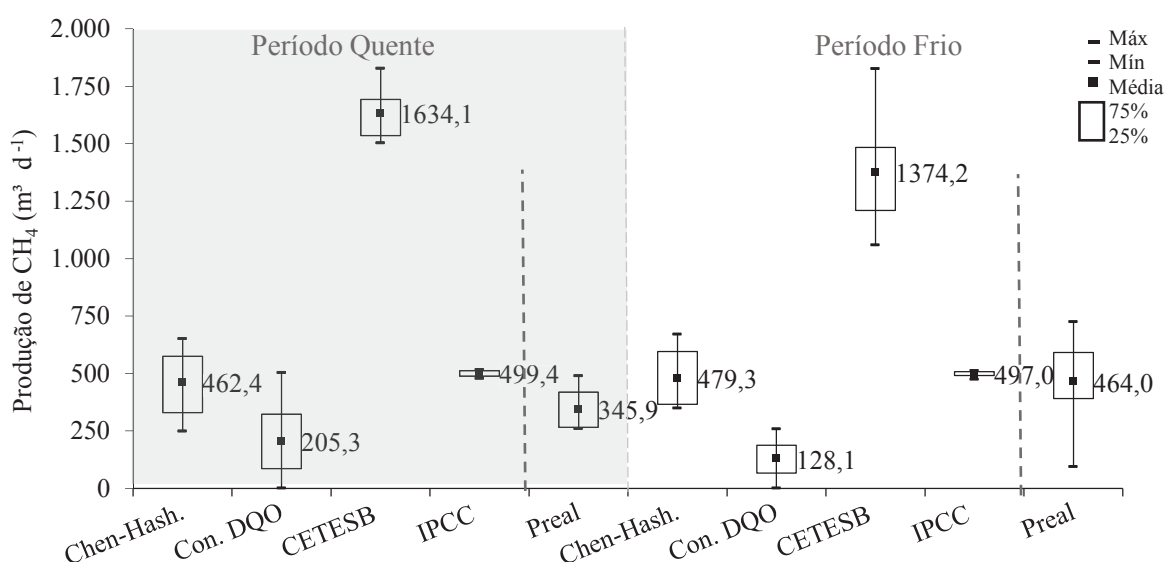
de biogás sugeridos são generalizados para todos os animais sem considerar as categorias de animais.

O modelo do IPCC (2006), por sua vez, apesar de ter sido proposto inicialmente para estimar o potencial de emissões de gases de efeito em inventários nacionais, apresentou estimativa da produção de metano da ordem de $498,2 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ d}^{-1}$, valor próximo ao dado real obtido no monitoramento da granja (Figura 2.9).

De modo geral, os modelos de Chen-Hashimoto e do IPCC foram os que apresentaram resultados mais próximos da produção CH_4 da granja avaliada. Entretanto, dentre os modelos avaliados o método do IPCC foi o que apresentou menor variação dos dados ao longo do período monitorado (Figura 2.9), porém é possível observar que a produção da granja monitorada apresenta variações dos resultados de produção de biogás (Figura 2.9), as quais, provavelmente, provocados pela alteração da qualidade dos efluentes. Entretanto, o IPCC não apresentou sensibilidade às flutuações da característica do efluente ao longo do período monitorado.

Na Figura 2.10 apresenta-se a comparação dos modelos com os dados de produção de metano obtidos na granja monitorada, considerando-se os períodos quente e frio.

Figura 2.10: Variações das produções volumétricas diárias de metano (CH_4) para os modelos avaliados e da granja monitorada, considerando o período quente (Out./18 a Mar./19) e frio (Set./18 e Abr. a Ago. /19)



Chen-Hash: Chen-Hashimoto (CHEN, 1983); Con. COD: Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016), CETESB: CETESB (2006), IPCC: IPCC (2006)

Como observado na Figura 2.10, na granja monitorada no período quente foi verificada menor produção de metano em comparação ao período frio, apesar de apresentar melhores temperaturas para a biodigestão. Tal fato pode estar relacionado a variações na produção dos animais e no consumo de água. A temperatura e umidade relativa alta nas instalações, nos períodos quentes, podem diminuir a produção animal (ZUCCA et al., 2018), aumentar o consumo de água e consequentemente aumentar a diluição de dejetos. Todavia, as variações do consumo de água podem ainda ter outras interferências decorrentes da qualidade da alimentação e estados fisiológico dos animais (MINORU; GUIMARÃES; AMARAL, 2016).

O modelo de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983) obteve resultado maior de produção de metano no período frio, comportamento similar ao da granja (Figura 2.10). Ao ser comparado com o período quente, o período frio apresentou menor diferença visual entre a estimativa de metano obtida pelo modelo Chen-Hashimoto e a granja monitorada. O modelo de conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016) não apresentou grandes variações entre período quente e frio (Figura 2.10), mas maiores resultados médios de biogás foram obtidos no período quente, e de um modo geral as produções médias foram distantes da produção média verificada na granja.

O modelo do IPCC (2006) apresentou maior produção de biogás no período frio (Figura 2.10), com valores médios próximos a produção verificada na granja monitorada, entretanto as variações dos dados resultados mensais foram bastante discrepante. Esse modelo apresenta apenas o número de animais como dado variável, e como este teve pouca variação, os resultados estiveram todos próximos do valor médio, comportamento diferente do verificado na granja, na qual apresentou produção volumétrica de metano variável ao longo dos períodos avaliados, como pode ser observado pelos mínimos máximos, observado na Figura 2.10. Já o modelo da CETESB (2006) além do número de animais, apresenta o percentual de metano no biogás como variável, e como observado na Figura 2.7, os menores percentuais de metano no biogás foram obtidos no período frio, o que repercutiu em uma menor produção volumétrica de metano nesse período, contrário do que foi observado na granja monitorada.

2.2.4 Ajustes dos modelos

Os modelos matemáticos Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016), e da CETESB (2006) foram avaliados como passíveis de serem adaptados a partir das premissas já apresentadas.

A estimativa de biogás pelo modelo de Conversão de DQO, segundo o princípio de balanço massa, como comentada anteriormente, tem sido amplamente estudada e recomenda para reatores anaeróbios tipo UASB no tratamento de esgoto sanitário. Entretanto, sabe-se que UASB tem TRH reduzido em comparação a BLC, além do mais a degradabilidade do esgoto difere dos dejetos suínos, o que resulta resultaria em diferentes coeficientes de conversão de lodo.

Assim, este trabalho propõe o uso de um novo coeficiente para efluentes de suinocultura, em biodigestores. Segundo Metcalf e Eddy (2016) o coeficiente de produção de sólidos pode ser determinado por meio da Equação 14, na qual leva em consideração o coeficiente de sólidos no sistema (Y_s) e de respiração endógena (K_d), além do TRH (Tabela 2.5). Além do mais, é possível observar que na segunda parte da Equação 8 (equação original), a DQO convertida em sólidos é determinada considerando apenas a vazão de entrada. Entretanto, a produção de sólidos está relacionada com o percentual de DQO degradada dentro do biodigestor e não convertida em biogás. Assim, propôs-se a determinação da produção de sólidos com base na DQO retida no biodigestor, quantificada a partir da diferença entre a DQO de entrada e de saída (Equação 15).

Tabela 2.6 – Ajustes do modelo Conversão de DQO, para estimativa de CH_4 em biodigestor BLC tratando efluente de suinocultura.

Equação	Observações
(14) $Y_{obs} = \frac{Y_s}{1 + K_d \times TRH}$	Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO ($kgDQO_{lodo} \ kgDQO_{aplic}^{-1}$); Y_s = Coeficiente de sólidos no sistema para efluentes de suinocultura ($0,03 \ kgDQO \ SVT \ kgDQO_{aplic}^{-1}$) ¹ ; K_d = Coeficiente de respiração endógena para efluentes de suinocultura ($0,011d^{-1}$) ¹ ; TRH = Tempo de retenção hidráulica (d);
(15) $DQO_{CH_4} = Q_{efl} \times (S_0 - S) - Y_{obs} \times Q_{efl} \times (S_0 - S)$	DQO_{CH_4} = carga de DQO convertida em metano ($kgDQO_{CH_4} \ d^{-1}$); S_0 = concentração da DQO no afluente ($kg \ m^{-3}$); S = concentração da DQO no efluente ($kg \ m^{-3}$); Q_{efl} = Vazão de efluentes ($m^3 \ d^{-1}$).

¹ (RODRIGUES, 2008)

Na instalação de tecnologias de biodigestão, como em outras tecnologias de tratamento, deve se atentar a eficiência de tratamento esperada, visto que essas tecnologias não removem a carga de matéria orgânica em sua totalidade. O modelo da CETESB, comumente utilizado na avaliação de instalação de biodigestores, considera o máximo potencial de produção de metano com base na produção total de dejetos. Assim foi proposto

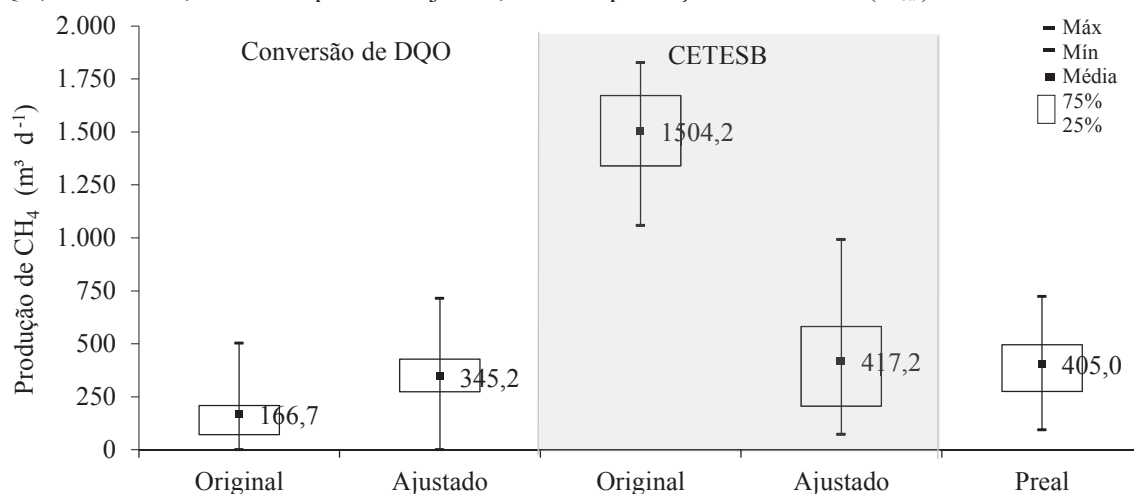
alterações na metodologia original, incluindo entre os dados de entrada a remoção de DQO, conforme descrito na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Ajustes do modelo da CETESB, para estimativa de CH₄ em biodigestor BLC tratando efluente de suinocultura

Equação	Observações
$(16) \quad Q_{CH_4} = \frac{1}{VE} \times (Pb \times EF\% \times N \times Mt \times CH_4\%)$	Q_{CH_4} = Produção de metano (m³ CH₄ d⁻¹); VE = volume específico do metano (0,67 kg CH₄ m⁻³ CH₄); Pb = Produção de biogás (0,062 kg_{biogás} kg_{Mt}⁻¹); EF = Eficiência de remoção de DQO (%); N = número total de animais; M_t = Matéria produzida por animal (2,25 kg_{Mt} d⁻¹ animal⁻¹); CH₄ = percentual de metano no biogás (%).

A Figura 2.11 apresenta os resultados referentes à estimativa da produção de diária de metano comparando-se os modelos ajustados, os modelos originais e os valores obtidos na granja monitorada (P_{real}).

Figura 2.11 – Variações das estimativas diárias de metano (CH₄) pelos modelos Conversão de DQO, e CETESB, antes e depois dos ajustes, frente a produção monitorada (P_{real})



O modelo de Conversão de DQO após os ajustes propostos apresentou um aumento no valor médio da produção de metano (345,2 m³ d⁻¹), embora o valor ainda esteja aquém do obtido no monitoramento da granja (405,0 m³ d⁻¹), indicando que o modelo subestima a produção de metano. A metodologia de balanço de massa parte do princípio da Lei de Conservação de Massa (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2000), em que o biogás é oriundo da biomassa retida e degradada no biodigestor. Analisando o comportamento de DQO (Figura 2.5) foi verificado que em alguns meses não houve remoção de DQO no sistema, o que pode

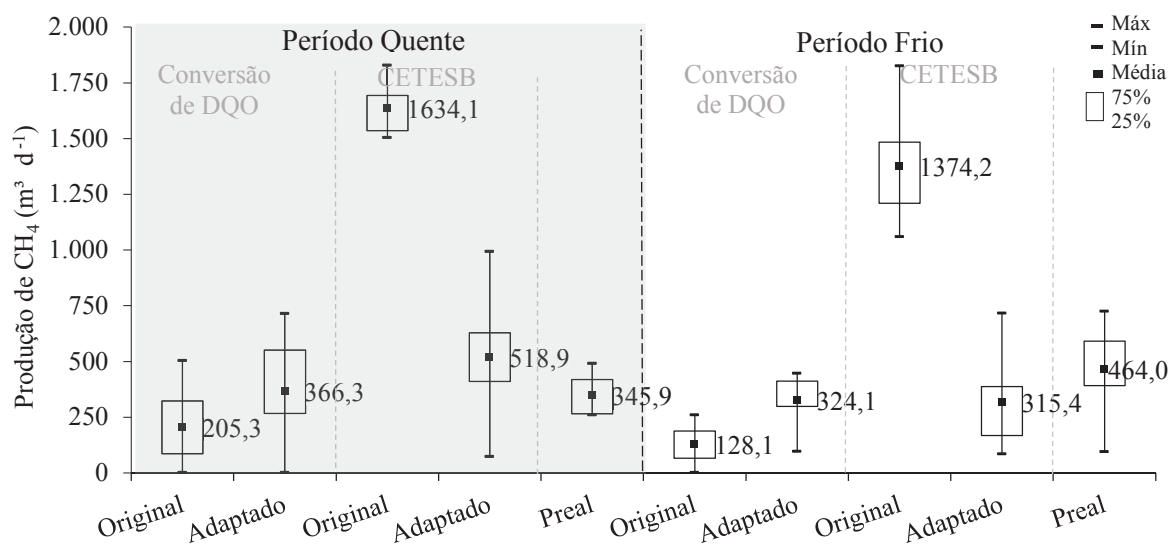
ter comprometido os resultados globais. Além disso, os valores do coeficiente de produção de sólidos (Y_{obs}) foram propostos, sendo que o mais indicado seria a determinação deste coeficiente para as condições reais dos biodigestores avaliados pelo teste da Atividade Metanogênica Específica (AME).

Todavia as pequenas eficiências de remoção de DQO ou até mesmo acréscimos de DQO pode estar associados ao acúmulo de sólidos no biodigestor não degradado ou ainda não removido do sistema (GIRARDI NETO; SILVA; PINHEIRO, 2017). Tal fato compromete a utilização desse modelo para estimativa de biogás, principalmente em biodigestores onde altos valores de TRH e grande variação da DQO afluenta afetam a quantificação de DQO retida dentro do biodigestor.

O modelo de CETESB ajustado com a adição do percentual de remoção de matéria orgânica, representada pela DQO, resultou em uma produção média de metano de 417,2 $m^3_{CH_4} d^{-1}$, tendo-se como valor de referência a produção diária média de 405,0 $m^3_{CH_4} d^{-1}$ na granja monitorada. Modelos simplificados como da CETESB tem ganhado a atenção, visto a limitada aplicabilidade de modelos complexos na operação e melhoria de plantas de biodigestores (YANG et al., 2016).

Na Figura 2.12 apresenta-se a comparação de Conversão de DQO e CETESB, antes e depois dos ajustes, com os dados de produção de metano obtidos na granja monitorada, considerando-se os períodos quente e frio.

Figura 2.12 – Variações das estimativas diárias de metano (CH_4) pelos modelos do balanço de massa e do IPCC, avaliados antes (modelo original) e depois dos ajustes, e produção de metano verificada na granja monitorada, no período quente (Out./18 a Mar./19) e frio (Set./18 e Abr. a Ago. /19)



O modelo conversão de DQO teve uma melhora nos seus valores de produção diária de metano, entretanto mesmo depois dos ajustes o período frio continuou apresentando menor produção de metano, divergente do P_{real} . Tal fato reforça as hipóteses de que a ineficiência desse método estar relacionada com a flutuação da vazão e variação da DQO afluyente que compromete a determinação da parcela de DQO removida no afluyente em biodigestores. O modelo ajustado da CETESB resultou em valores médios de produção de metano próximos aos observados na granja. Entretanto, assim como o balanço de massa apresentou menor produção de metano no período frio em comparação com o período quente, o qual é divergente do comportamento observado na granja. Tal fato pode estar relacionado com as remoções de DQO obtidas no monitoramento e consideradas como parâmetro de entrada desses modelos ajustados.

2.2.5 Análise estatística dos modelos

Os resultados da análise estatística da produção de metano obtida pelos modelos matemáticos em comparação com a produção obtida na granja monitorada podem ser observados Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Análise estatística do resultado de produção de metano (CH₄) obtida por meio dos modelos matemáticos em comparação com a produção observada na granja (P_{actual}).

	Chen-Hashimoto (CHEN, 1983)	Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016)	CETESB (2006)	IPCC (2006)	Conversão de DQO ajustado	CETESB ajustado
Média (m ³ _{CH₄} d ⁻¹)	470,8	166,7	1504,2	498,2	345,2	417,2
t_{calc}	-0,1 ^{ns}	-6,2 [*]	5,8 [*]	0,4 ^{ns}	1,7 ^{ns}	0,4 ^{ns}
BIAS (m ³ d ⁻¹)	65,9	-238,3	1099,2	93,2	-59,8	12,2

Teste “t”- H₀: $\beta_1 = 1$ ($\mu_{\text{modelo}} = \mu_{\text{Pactual}}$) e H₁: $\beta_1 \neq 1$ ($\mu_{\text{modelo}} \neq \mu_{\text{Pactual}}$); ^{*}: As médias diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns}: As médias não diferem estatisticamente entre si; t_{tab} 5% (11) 2,26

Os modelos de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983), IPCC (2006), não apresentaram diferença estatística significativa em comparação com a produção obtida na granja. Todavia, os modelos originais da CETESB (2006) e de Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016) diferiram estatisticamente da produção da granja, ao nível de 5% de probabilidade. A resultados dos modelos do período quente em comparação com o período frio não apresentam diferença significativa à 5% de probabilidade. Entre os modelos originais avaliados, o modelo de Chen-Hashimoto foi o que apresentou melhor desempenho qualitativo (menor BIAS).

Camilo (2017) avaliando a segunda equação de Chen-Hashimoto superestimou o valor real de produção de biogás, enquanto que a metodologia do IPCC subestimou. Por sua vez, Yang et al. (2016), de modo geral, obtiveram melhor desempenho estatístico para o modelo Chen-Hashimoto, em comparação com outros modelos, avaliados a partir de experimento laboratorial com dejetos suínos, concomitante ao presente trabalho, realizado em escala plena, que apresentou menor BIAS quando avaliado o modelo de Chen-Hashimoto, frente ao demais (Tabela 2.7).

Após os ajustes do modelo de Conversão de DQO e o modelo da CETESB resultaram em produção de metano iguais ao observado na granja, em nível de 5% de probabilidade. O modelo de Conversão de DQO foi interessante para a estimativa da produção de biogás em biodigestores BLC. Entretanto, esse modelo apresenta diversos parâmetros de entrada, que necessitam de informações mais precisas, da granja, obtidas em sistemas de biodigestores já instalados, sendo então interessante para instalações de projetos de aproveitamento energético os quais já possuam biodigestores em operação.

Todavia, o modelo da CETESB ajustado pode ser empregado em granjas suínolas para estimar o potencial energético para biodigestores já instalados, e também interessante opção para granjas que possuem a pretensão de instalação de biodigestores. As variáveis de entrada desse modelo são: o número de animais, o percentual de metano no biogás, o qual pode ser tabulado e a eficiência de remoção de DQO que pode ser atribuído o valor da

eficiência esperada a tecnologia instalada, que de modo geral, em biodigestores anaeróbios espera-se pelo menos 40% (SILVA et al., 2015). Além do mais o modelo da CETESB ajustado apresentou BIAS mais próximo de zero, o que remete ao menor erro sistemático, em comparação ao modelo de Conversão de DQO ajustado.

Ressalta-se que não foi incorporado no escopo deste trabalho: (i) a verificação dos modelos, com análise de resíduos (diferenças entre cada dado observado e medido); (ii) análise de incertezas, que retoma a confiabilidade dos dados de entrada; e a (iii) validação que consiste na verificação do modelo utilizando uma série de dados diferentes dos dados utilizados para determinação dos ajustes.

2.3 CONCLUSÕES

As estimativas de metano em biodigestores BLC, tratando efluentes de suínos, por meio dos modelos de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983) e IPCC (2006) não apresentaram diferença estatística significativa em comparação com a produção real.

O modelo de IPCC original não apresentou sensibilidade às variações características do efluente da granja. Entre os modelos matemáticos originais avaliados para a estimativa de metano o modelo de Chen-Hashimoto apresentou o melhor desempenho de estimativa quanto ao BIAS.

Os modelos originais da CETESB (2006) e de Conversão de DQO (CHERNICHARO, 2016) diferiram estatisticamente da produção da granja, ao nível de 5% de probabilidade. Entretanto, passaram a ser estatisticamente iguais após ajustes propostos.

Em granjas com biodigestores já instalados com monitoramento das características dos efluentes torna-se interessante a utilização do modelo de Conversão de DQO ajustado para projetos de aproveitamento de metano.

Em projetos de biodigestores, o modelo da CETESB ajustado pode ser aplicado tendo conhecimento apenas do número de animais e da eficiência esperada no tratamento anaeróbio. Este também pode ser aplicado em projetos já instalados com dados de monitoramento referente ao número de animais, composição do biogás, e remoção de DQO e em projetos de biodigestores, fornecendo informações mais assertivas na operação de biodigestores de acordo a realidade brasileira.

O estudo de modelos matemáticos, com banco de dados de monitoramento de granja suinícola, possibilitou a recomendação e ajustes de modelos matemáticos para estimativa de

biogás, fornecendo informações mais confiáveis, para serem utilizadas em projetos de biodigestores modelo lagoa coberta.

2.4 REFERÊNCIAS

AIRES, A. W. et al. Avaliação do desempenho de um biodigestor canadense modificado no tratamento de dejetos de suínos. **Engvista**, v. 16, n. 4, p. 329–338, 2014.

AL-HAMAMRE, Z. et al. Wastes and biomass materials as sustainable-renewable energy resources for Jordan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 295–314, 2017.

AMARAL, A. C. DO 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.

ANAWAR, H. M.; STREZOV, V. Chapter 1 Current Status of Renewable Energy Systems from Biomass. In: VLADIMIR STREZOV; ANAWAR, H. M. (Eds.). **Renewable Energy Systems from Biomass**. 1st ed. Boca Raton: [s.n.]. p. 278.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION & AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. **American public health association**, 2017.

BEYENE, A. et al. The impact of traditional coffee processing on river water quality in Ethiopia and the urgency of adopting sound environmental practices. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 11, p. 7053–7063, 2012.

BHATTACHARYA, M. et al. The effect of renewable energy consumption on economic growth : Evidence from top 38 countries. **Applied Energy**, v. 162, p. 733–741, 2016.

BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 275–282, 2016.

BOTREL, M. DE A.; ALVIM, M. J. Avaliação de cultivares de alfafa na zona da mata de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 32, n. 9, p. 971–975, 1997.

BRUNO, M.; OLIVEIRA, R. A. DE. Tratamento anaeróbico de águas residuárias do beneficiamento de café por via úmida em reatores UASB. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 364–377, 2008.

CAMILO, N. C. **Suinocultura e o potencial energético do biogás no município de São Miguel do Iguaçu - PR**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

CETESB. Manual do usuário do programa de computador Biogás: geração e uso energético - efluentes e resíduo rural - versão 1.0. **Secretaria do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia, CETESB (São Paulo)**, p. 1–61, 2006.

CHAE, K. J. et al. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas

yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. v. 99, p. 1–6, 2008.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agricultural Wastes**, v. 8, n. 2, p. 65–81, 1983.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores anaeróbios**. 2 ed ampl ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

COLUNA, N. M. E. **Análise do potencial energético dos resíduos provenientes da cadeia agroindustrial da proteína animal no Estado de São Paulo**. [s.l.] Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2016.

COMASTRI FILHO, J. A. **Biogás: independencia energetica do Pantanal Mato-Grossense** EMBRAPA-UEPAE Corumba Corumba, 1981.

DONOSO-BRAVO, A. et al. Bioresource Technology Explicit temperature-based model for anaerobic digestion : Application in domestic wastewater treatment in a UASB reactor. **Bioresource Technology**, v. 133, p. 437–442, 2013.

ER-BR. **GRUPOS GERADORES A GÁS BIOGÁS - GÁS NATURAL - SYNGAS - GLP** Londrina - PRER-Br - Energias Renováveis, , 2018. Disponível em: <www.erbr.com.br>

EUSTAQUIO JUNIOR, V. et al. Eficiência de sistemas de aeração em cascatas no tratamento de águas residuárias do café. **Coffee Science**, v. 9, n. 4, p. 435–444, 2014.

FERNANDES, D. M. et al. Processo de biodigestão anaeróbia em uma granja de suínos. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 10, n. 3, p. 741–754, 2014.

FERNANDES, J. Á. **Variáveis microbiológicas e físico-químicas em biodigestores anaeróbios escala piloto alimentados com dejetos de bovinos leiteiros e suínos**. [s.l.] Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.

FERREIRA, N. A. DE L. et al. Avaliação das concentrações de metano gerado em um biorreator de bancada com base em parâmetros físico-químicos. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 473–479, 2017.

GIRARDI NETO, J.; SILVA, J. D. DA; PINHEIRO, I. G. Balanço de massa no tratamento de resíduos sólidos orgânicos provenientes de restaurantes em biorreator Mass balance in the treatment of organic wastes from restaurants in bioreactor. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 491–499, 2017.

GONZAGA, D. A.; BARBOSA, R. C. Estimativa do tamanho mínimo de rebanho suíno para a implementação de sistema de geração de energia elétrica de 35 kWh, 150 kWh e 590 kWh, usando biogás como combustível para grupos geradores. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v. 6, n. 2, p. 26–32, 2016.

HAGOS, K. et al. Anaerobic co-digestion process for biogas production : Progress , challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, n. September 2016, p. 1485–1496, 2017.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de

simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011.

HANSEN, S. V. Biomass residues as twenty-first century bioenergy feedstock — a comparison of eight integrated assessment models. **Climatic Change**, 2019.

HASAN, C. et al. Produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais: análise dos teores de sólidos totais, voláteis e fixos em amostras pré digestão anaeróbia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, p. 257–273, 2019.

HASSANEIN, A. A. M. et al. Simulation and validation of a model for heating underground biogas digesters by solar energy. **Ecological Engineering**, v. 82, p. 336–344, 2015.

HREIZ, R. et al. Modeling and simulation of heat transfer phenomena in a semi-buried anaerobic digester. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 119, p. 101–116, 2017.

IPCC. Emissions From Livestock and Manure Management. In: AUTORES: HONGMIN DONG (CHINA), JOE MANGINO (USA), AND T. A. M. (CANADA); JERRY L. HATFIELD (USA), DONALD E. JOHNSON (USA), KEITH R. LASSEY (NEW ZEALAND), MAGDA APARECIDA DE LIMA (BRAZIL), AND A. R. (RUSSIAN F. (Eds.). . **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [s.l.] (China), Hongmin Dong, 2006. v. Volume 4p. 10.1-10.87.

KERKHOFF, S. et al. **Potencial teórico de produção de biogás e energia elétrica a partir da biomassa residual da suinocultura da Região Oeste do Paraná**. 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. **Anais...**2015

LIU, C. et al. Bioresource Technology Biogas production and microbial community properties during anaerobic digestion of corn stover at different temperatures. **Bioresource Technology**, v. 261, n. December 2017, p. 93–103, 2018.

LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. **Water Science and Technology**, p. 2745–2753, 2012.

MANSER, N. D.; MIHELIC, J. R.; ERGAS, S. J. Bioresource Technology Semi-continuous mesophilic anaerobic digester performance under variations in solids retention time and feeding frequency. **BIORESOURCE TECHNOLOGY**, v. 190, p. 359–366, 2015.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 2016. ed. McGraw Hill Brasil: [s.n.].

MINORU, I.; GUIMARÃES, D.; AMARAL, G. Impactos ambientais da suinocultura : desafios e oportunidades. **BNDES Setorial**, n. 44, p. 125–156, 2016.

MITO, J. Y. DE L. et al. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. Documentos ed. Concórdia : Embrapa Suínos e Aves: Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2018.

MOTTA, F. S. DA. **Produza sua energia – biodigestores anaeróbicos**. Editora S. ed. Recife - PB: [s.n.].

NETO, J. G.; SILVA, J. D. DA; PINHEIRO, I. G. Balanço de massa no tratamento de resíduos sólidos orgânicos provenientes de restaurantes em biorreator Mass balance in the treatment of organic wastes from restaurants in bioreactor. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 22, p. 491–499, 2017.

OLIVEIRA, P. A. V. DE. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia - SC: Documento 27, 1993.

OLIVEIRA, P. A. V. DE; HIGARASHI, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Documentos ed. Concórdia, SC: [s.n.].

OLIVEIRA, J. C. S. O. From transport and storage to control of the process: the challenge of biodigestion from drawings of swine in agroindustrial scale. **Independent Journal of Management & Production (IJM&P)**, v. 8, n. 5, Edição Especial, p. 747–766, 2016.

OLIVEIRA, L. G. D. E. **Comparação de alternativas de produção de biogás a partir da combinação de substratos da suinocultura com resíduos de batata da região dos Campos Gerais: oportunidades e discussões**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

OUMER, A. N. et al. Bio-based liquid fuels as a source of renewable energy : A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, n. December 2016, p. 82–98, 2018.

PHAM, C. H.; TRIOLO, J. M.; SOMMER, S. G. Predicting methane production in simple and unheated biogas digesters at low temperatures. **Applied Energy**, v. 136, p. 1–6, 2014.

RESENDE, J. A. et al. Seasonal Variation on Microbial Community and Methane Production during Anaerobic Digestion of Cattle Manure in Brazil. **Microbial Ecology**, v. 71, n. 3, p. 735–746, 2016.

RODRIGUES, L. DOS S. **Concepção e avaliação de sistema de tratamento com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) e lagoa de polimento para águas residuárias de suinocultura**. [s.l.] niversidade Federal de Minas Gerais, 2008.

ROSA, A. P. et al. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB : estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 21, p. 315–328, 2016.

SANTOS, E. L. B. DOS; NARDIR JUNIOR, G. DE. Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal. **Tekhne e Logos**, v. 4, n. 2, p. 81–90, 2013.

SILVA, C. B. DA. **Abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SILVA, M. L. DA et al. Anaerobic biodigester as a technology for the use of swine draws: sustainable alternative in the municipality of Barreira, Ceará. **Interdisciplinary Scientific Journal**, v. 5, n. 3, p. 1–14, 2018.

SILVA, F. P. et al. Parâmetros físico-químico na operação de biodigestores para suinocultura. **Revista Tecnológica**, v. Edição Esp, p. 33–41, 2015.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 5 ed ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

SOUZA, C. DE F. et al. Potencial de dejetos de suínos como substrato na biodigestão anaeróbia sob efeito de diferentes temperaturas e tempos de retenção hidráulica. **Revista Ceres**, v. 52, n. 300, p. 11, 2005.

SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L.; AQUINO, S. F. Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 11, p. 2259–2264, 2011.

SOUZA, J. C. P. V. B. et al. **Gestão da água na suinocultura**. 1ª ed ed. Concórdia, SC: [s.n.].

USDA. **Market and Trade Data: Meat and Poultry**. Disponível em:

<<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/topCountriesByCommodity#chart28>>.

VELOSO, A. V. et al. Sustentabilidade ambiental da suinocultura com manejo de dejetos em biodigestor – avaliação de parâmetros físico-químicos. **Revista Energia na Agricultura**, v. 26, n. 4, p. 322–333, 2018.

VOLOSHIN, R. A. et al. Review : Biofuel production from plant and algal biomass. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 39, p. 17257–17273, 2016.

YANG, H. et al. A model for methane production in anaerobic digestion of swine wastewater. **Water Research**, v. 102, p. 464–474, 2016.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma sstação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. [s.l.] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012.

ZUCCA, R. et al. Estimativa da produção de biogás e energia decorrentes da suinocultura brasileira. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer**, v. 15, n. 28, p. 481–490, 2018.

3 TROCAS TÉRMICAS EM BIODIGESTORES MODELO LAGOA COBERTA SOB DIFERENTES MODELOS DE SIMULAÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbia é uma das soluções mais promissoras para estabilização de resíduos orgânicos, como os dejetos de animais, e tem sido adotada para o tratamento de efluentes suínicos como método preferencial, por conta da alta carga orgânica. Entre os benefícios desse processo estão a redução de odor, a minimização da emissão de gases de efeito estufa, baixa produção de lodo e produção de energia renovável (CHERNICHARO, 2016; MIRTOSOU-XANTHOPOULOU; SKIADAS; GAVALA, 2019; SHEETS et al., 2015).

A biodigestão anaeróbia permite a geração de energia renovável descentralizada, visto que pode ser explorada em diferentes regiões que possuem biomassa de dejetos animal, por meio da instalação de biodigestores de pequeno ou grande porte (FREITAS et al., 2019; LIU et al., 2018). No processo de biodigestão anaeróbia a matéria orgânica é degradada em um processo sequencial e complexo que contempla os estágios da hidrólise, fermentação, acetogênese e metanogênese. A produção de metano, gás com elevado poder calorífico, ocorre no último estágio da digestão anaeróbia pela ação das arqueias metanogênicas (LIU et al., 2018; XU et al., 2018; YANG et al., 2014).

Dentre os principais fatores que podem interferir na produção de biogás, destacam-se a carregamento orgânico volumétrico, tempo de retenção hidráulica e a temperatura. A temperatura é um dos parâmetros que mais interfere na atividade microbiana e consequentemente na eficiência de tratamento (FREITAS et al., 2019; LIU et al., 2018).

Em geral, o crescimento microbiano ocorre em três distintas faixas de temperatura, em processos biológicos, faixa psicrófila (4 e ≈ 15 °C), mesófila (20 e ≈ 40 °C) e termófila (45 e ≈ 70 °C). A formação de metano pode ocorrer em uma faixa bastante ampla, no entanto, os níveis ótimos de temperatura para o crescimento microbiano estão associados às faixas mesófila (30 a 35 °C) e termófila (50 a 55 °C) (CHERNICHARO, 2016), sendo que a manutenção da temperatura durante a digestão anaeróbia é de grande importância, visto que mudanças bruscas de temperatura podem levar ao desbalanceamento entre as populações microbianas. Alterações na temperatura em poucos graus (acima de 2 °C) pode levar a uma taxa abrupta do crescimento microbiano, podendo até ser anulada (CHERNICHARO, 2016; VILLA-MONTOYA; FERRO; OLIVEIRA, 2017).

A faixa termófila possui capacidade de produzir maiores volumes de biogás, no entanto os biodigestores têm sido projetados na faixa mesófila por depender menos de suplemento de energia para o aquecimento da biomassa residente. Além do mais, a faixa termófila apresenta menor diversidade microbiana e, portanto, maior susceptibilidade a inibição e alterações operacionais.

No Brasil, o biodigestor tubular de manta plástica denominado biodigestor lagoa coberta (BLC) ou *plug-flow*, popularmente conhecido por biodigestor canadense tem sido amplamente instalado, principalmente pelo baixo custo, comparado com outros modelos (FERNANDES FILHO; SANTANA; GATTAMORTA, 2018; KHANAL; TIRTA NINDHIA; NITAYAVARDHANA, 2019). No entanto, como o isolamento do meio é apenas pelas camadas de membranas plásticas, esse modelo de biodigestor recebe forte influência das temperaturas do seu contorno, o que impacta no desempenho da população microbológica no seu interior, e consequentemente, na produção de biogás.

Nesse sentido, alguns programas computacionais como ANSYS CFX (NSAIR et al., 2019; WANG; ZHANG; HUO, 2017) e Fluent CFD (LIU et al., 2017) têm sido empregados no intuito de entender o comportamento das temperaturas dos biodigestores e as interações das trocas térmicas dos biodigestores. Recentemente o software *EnergyPlus* tem sido empregado para simulações em biodigestores (BAVUTTI et al., 2014; HASSANEIN et al., 2015; VAZ, 2019), por permitir a compreensão dos processos de trocas térmicas em um regime dinâmico que envolve um longo período de tempo. Essas informações são importantes para aprimoramento de projeto e de aspectos operacionais de biodigestores, como verificar a influência de diferentes materiais construtivos, no isolamento térmico, ou máximo aproveitamento da radiação solar.

Todavia, o programa é ainda pouco explorado em biodigestores modelo lagoa coberta em escala plena sob condições tropicais. Além do mais, as simulações comumente utilizadas consideram os biodigestores como um ambiente composto apenas por uma única zona térmica, apresentando apenas um resultado de temperatura interna, como valor intermediário entre o biogás e a biomassa residente (VAZ, 2019).

Entretanto, sabe-se que a biomassa residente e biogás apresentam comportamentos térmicos distintos, os quais deveriam ser representados por duas zonas térmicas. A investigação de modelos de simulações diferentes, em biodigestores em escala plena, é necessária para a obtenção de resultados mais confiáveis, em comparação com dados medidos. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar e comparar dois modelos distintos de

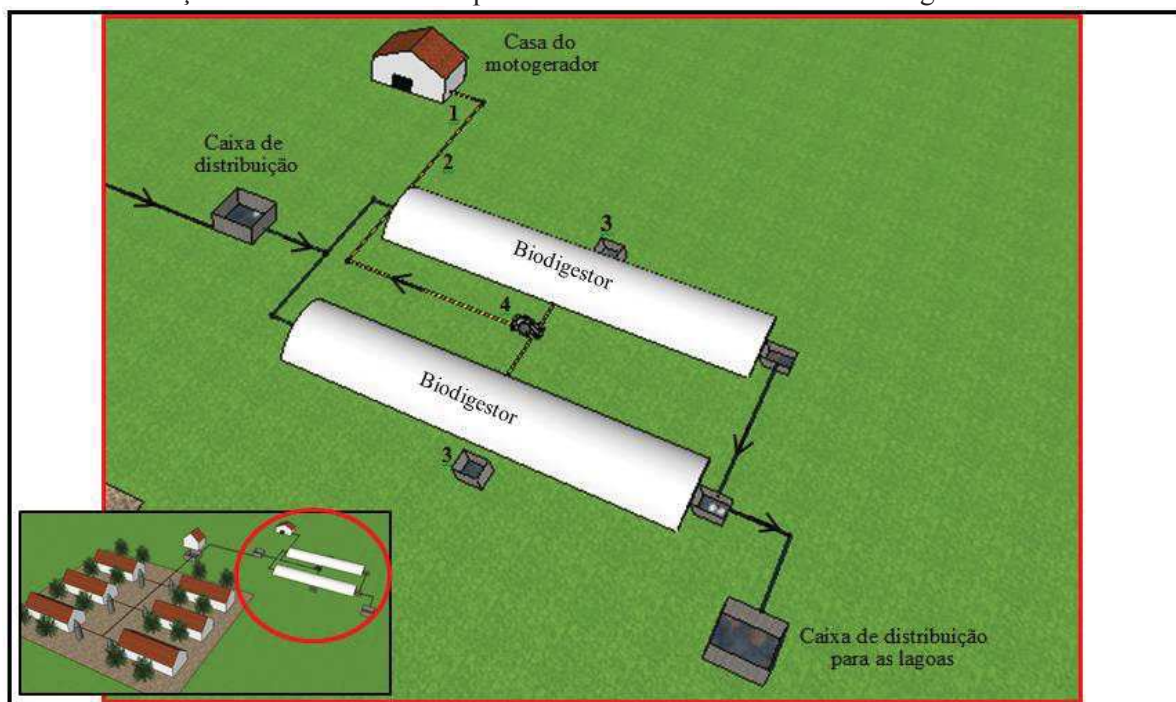
simulação de ganhos energéticos, em biodigestor lagoa coberta, por meio do software *EnergyPlus*.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Descrição do sistema monitorado

O biodigestor modelo lagoa coberta, utilizado para a simulação e validação das trocas térmicas, está instalado em uma granja de suinocultura no município de Teixeira, na Zona Mata Mineira, estado de Minas Gerais com coordenadas geográficas 20°34'07,2" W, 42°52'01,6" S (Figura 3.1). A granja possui ciclo completo, com aproximadamente 1.000 matrizes, os efluentes são destinados a dois biodigestores em paralelo, onde o biogás produzido é destinado para produção de energia elétrica em um sistema de motogeração.

Figura 3.1 - Croqui da granja suinícola com sistema de tratamento de efluentes, com a indicação dos locais de instalação dos sensores das temperaturas externas e internas aos biodigestores.



1: Ambiente; 2: Solo; 3: Biomassa residente; 4: Biogás.

Para a validação foram utilizadas informações de temperaturas médias horárias do ambiente, do biogás, da biomassa residente, e do solo a um metro de profundidade, providas dos biodigestores instalado na granja suinícola. Os sensores instalados na granja são conectados a um *datalogger*, que por meio de telemetria envia os dados de forma contínua e

em tempo real, a uma central de monitoramento, instalada no Centro de Conhecimento em Bioenergia da Universidade Federal de Viçosa - UFV. Os dados são registrados em um sistema de gerenciamento de dados (MySQL), em uma frequência de 30 segundos. Esses dados passam por um tratamento, no intuito de remover *outliers* e demais inconsistências que possam ocorrer, sendo depois armazenados em um banco de dados.

3.2.2 Premissas para o estudo das trocas térmicas nos biodigestores

Neste trabalho o software *EnergyPlus* (versão 8.7) foi utilizado para simular o consumo de energia e as trocas térmicas resultantes de efeitos radiantes, convectivos e condutivos, em ambientes fechados dos biodigestores em escala plena. A inserção de zonas térmicas foi baseada na hipótese de que a composição do ar e a temperatura interna do biodigestor são homogêneas. Entretanto, massas internas podem ser inseridas, no intuito de contabilizar a inércia térmica adicional que pode ter a capacidade de estabilizar a temperatura interior da zona com a interferência de sua massa. A massa correspondente ao biogás no *EnergyPlus* não é modelada, por apresentar propriedades termofísicas similares ao ar, e não atribui inércia a “construção” (biodigestor). No processo de biodigestão, a geração de calor microbiano pode ser negligenciada, visto as pequenas produções de energias exotérmicas geradas no processo (LIU et al., 2017).

O *EnergyPlus* utiliza o método de cálculo *Heat Balance Method* (HBM), o qual tem como base o balanço energético entre as superfícies interiores e exteriores e o ar da zona interior. HBM considera todo o fluxo de energia em cada uma das zonas com um conjunto de equações de balanço de energia, combinadas com algoritmos e diversas informações climáticas como temperatura do bulbo seco e úmido do ar externo, radiação solar e velocidade do vento, conforme descritos no *Engineering Reference* (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2016).

O balanço de calor nas superfícies externas pode ser descrito, de forma geral, pelas Equações 17.

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (17)$$

Em que:

q''_{asol} = Fluxo de calor por radiação solar direta e difusa absorvida (comprimento de ondas curtas).

q''_{LWR} = Fluxo líquido de radiação de comprimento de onda longa (térmica) com o ar e os arredores.

q''_{conv} = Fluxo de calor por convecção com o ar externo.

q''_{ko} = Fluxo de calor por condução (q/A) por meio da parede.

Todos os fluxos de calor no cálculo (Equação 17) são positivos, com exceção da condução, que pode ser considerado positivo na direção de fora para dentro.

Nas superfícies internas, o balanço de calor pode ser representada pela Equação 18.

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (18)$$

Em que:

q''_{LWX} = Fluxo líquido de calor radiante de ondas longas entre superfícies da zona.

q''_{SW} = Fluxo líquido de calor por radiação de ondas curtas para a superfície, por meio de fontes de iluminação.

q''_{LWS} = Fluxo de calor por radiação de ondas longas de equipamentos na zona.

q''_{ki} = Fluxo de calor por condução através da parede.

q''_{sol} = Fluxo de calor por radiação solar absorvida e transmitida pela superfície.

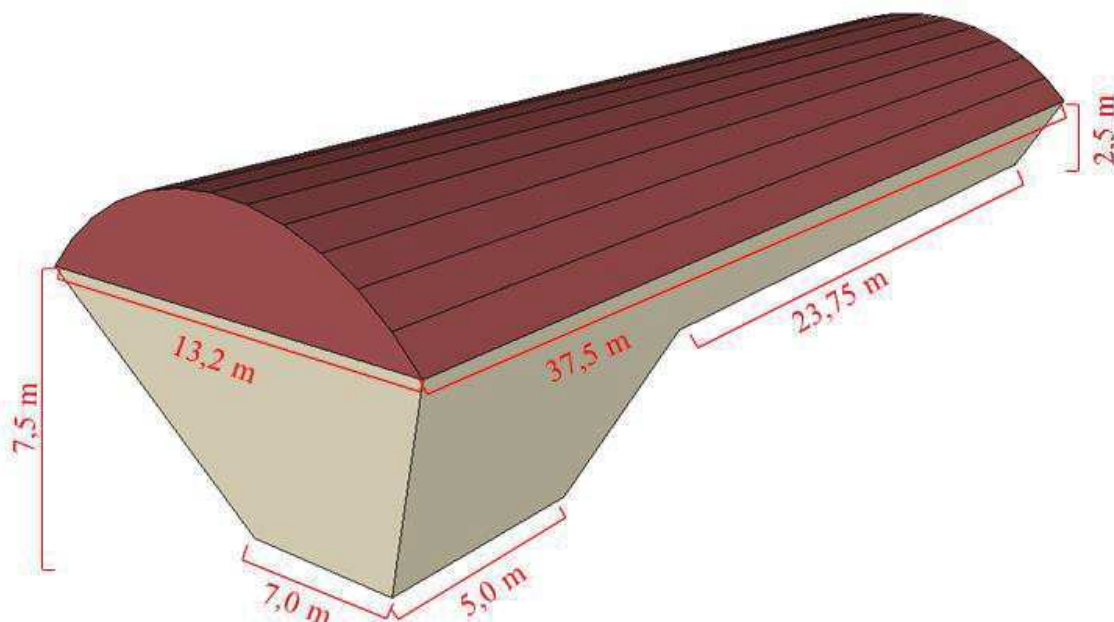
q''_{conv} = Fluxo de calor por convecção do ar interno da zona.

Para a simulação do biodigestor no *EnergyPlus* foram selecionados intervalos de 20 dias para o período quente (11 a 30/Jan.) e frio (11 a 30/Jul.), equivalentes ao tempo de retenção hidráulica do biodigestor reportado por Sousa (2019). O balanço térmico entre o biodigestor e o subsolo foi simulado utilizando o objeto Ground Domain: Basement, destinados a construções com paredes em contato com o solo. O cálculo do balanço térmico foi realizado em intervalos de 15 min, o que corresponde a um “*Timestep*” igual a 4 (uma hora subdivida em intervalos de 15min). A simulação das trocas térmicas foi realizada a partir da modelagem da geometria do biodigestor, do solo e da massa interna.

3.2.2.1 Modelagem da geometria do Biodigestor

O biodigestor utilizado na simulação é do tipo lagoa coberta, o qual é escavado no solo, possuindo um volume de 1.250 m³ para a digestão de efluentes de suinocultura. A geometria inserida no *EnergyPlus* foi desenhada no programa *SketchUp* 2017 e está representada na Figura 3.2.

Figura 3.2: Desenho do biodigestor lagoa coberta, com suas respectivas dimensões.



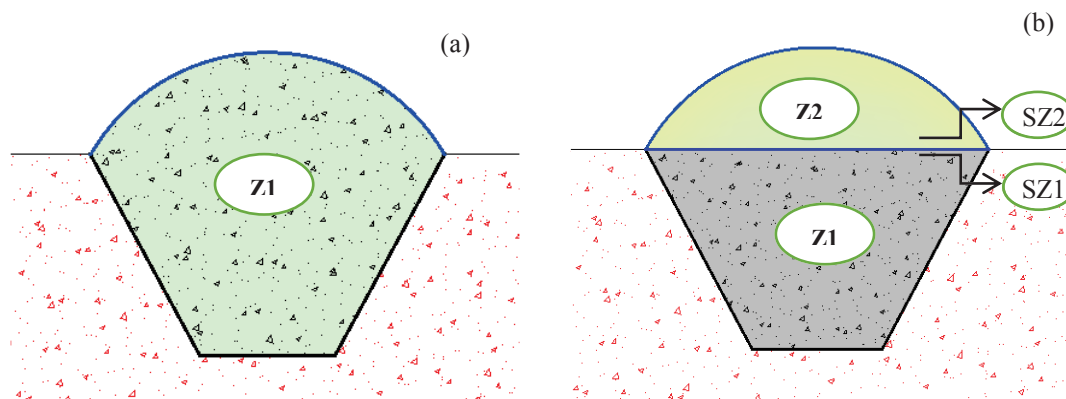
As paredes do biodigestor são isoladas do solo por meio de uma camada de manta de PVC. A campânula (ou gasômetro) possui pressão máxima de 15 mca, e também é isolada do meio externo meio de membrana PVC. Para a simulação, as características da membrana de PVC foram consideradas como apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedade termofísicas da membrana de PVC

Propriedade termofísicas	Valor	Referência
Densidade (kg m^{-3})	1.470	DIM53479
Espessura (mm)	1	ASTM5199
Calor específico ($\text{J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	1.674,72	ASTMD3417
Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	0,21	DIM 52612

O biodigestor modelo lagoa coberta possui duas diferentes massas no seu interior: a biomassa residente e o biogás. Foram estudados dois cenários para as trocas térmicas no interior do biodigestor em termos da sua geometria: (i) ambiente interno composto por uma única zona térmica (Z1) (Figura 3.3-a), e (ii) ambiente interno composto por duas zonas térmicas (Figura 3.3-b) - biomassa residente (Z1) em contato com o solo, e biogás (Z2).

Figura 3.3 – Geometria e configuração interna do biodigestor modelo lagoa coberta (a) única zona térmica (b) zona térmica composta (biogás e biomassa residente).



(a): Z1 – única zona térmica (biogás e biomassa); (b): Z1 – zona térmica da biomassa; Z2 – zona térmica do biogás; SZ1 - superfície superior a Z1; SZ2 - superfície inferior a Z2.

3.2.2.2 Modelagem do solo

As simulações de trocas térmicas foram realizadas para duas situações distintas de solo, a saber: solo seco (período de inverno) e solo saturado (período de verão). Para cada uma dos períodos avaliados, os quais consideram diferentes condições do solo, a simulação foi realizada para zona interna única e composta.

A simulação foi realizada utilizando o objeto Ground Domain (GDomain) com o pré-processamento Basement, descrito no *Input/Output Manual* do software (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2016), destinados a construções com paredes em contato com o solo, como é o caso do biodigestor BLC. No GDomain selecionou-se o método numérico de Xing, desenvolvido por Xing (2014) no qual exige um maior e mais complexo conjunto de dados (ELI et al., 2019), já utilizado com sucesso em simulação de ambientes subterrâneos (RESENDE; SOUZA; GOMES, 2019).

Para simulação das trocas térmicas o solo foi considerado com propriedades argilosas. As propriedades termofísicas do solo são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Propriedades termofísicas do solo adotadas para a modelagem do solo.

Material	Propriedades termofísicas	Valor
Solo Seco	Densidade (kg m^{-3})	1.600
	Calor específico ($\text{J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	890
	Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	0,25
Solo Saturado	Densidade (kg m^{-3})	2.000
	Calor específico ($\text{J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	1.550
	Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	1,58

Fonte: Adaptado de Oke (1987)

3.2.2.3 Modelagem da massa interna

Para a simulação da contribuição térmica da biomassa residente contido na câmara de digestão no biodigestor fez-se necessário a inserção de uma massa interna (*Internal Mass*) no software *EnergyPlus*. Como propriedades da *Internal Mass* referente à biomassa residente, foram adotados valores de calor específico e de condutividade atribuídos à água, visto que a biomassa residente apresenta alto teor de água. Para a superfície de separação entre a zona do biogás e da biomassa residente foram adotadas as mesmas propriedades termofísicas atribuídas da biomassa residente. As propriedades termofísicas estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Propriedade termofísicas adotadas para a modelagem da biomassa residente e para a superfície de separação entre a zona do biogás e da biomassa residente

Propriedade Térmofísicas	Valor	Referência
Densidade (kg m^{-3})	1.040	SOUZA et al. (2009)
Calor específico ($\text{J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	4.180	OKE (1995)
Condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	0,57	OKE (1995)

3.2.2.4 Dados Climáticos

Na simulação é necessário fornecer ao software as condições de contorno da construção (biodigestor) a ser modelada. Tal procedimento ocorre pela adição de um arquivo climático do local analisado. Neste caso, foi utilizado o arquivo climático da cidade Viçosa-MG, elaborado pelo Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LATECAE - UFV), conforme metodologia especificada por Guimarães (2016), com dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da estação meteorológica instalada na Universidade Federal de Viçosa, a uma distância de aproximadamente de 20 km do local dos biodigestores.

3.2.3 Análise e validação dos modelos

Os resultados das temperaturas internas e externas ao biodigestor obtidas na simulação foram avaliados em comparação com as variáveis oriundas do monitoramento da granja para o período de verão e inverno, por meio de gráficos com médias horárias. Para a validação utilizou-se indicadores de desempenho: raiz do erro quadrático médio (REQM) e raiz do erro quadrático médio relativo (REQMR) detalhados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Descrição dos indicadores de desempenho estudados para temperaturas.

Item	Equação	Observações
Raiz do erro quadrático médio	(Eq.14) $REQM = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y_i - x_i)^2}{n}}$	REQM= Raiz do erro quadrático médio; y_i = Valores obtidos por simulação; x_i = Valores observados; n = Número de valores analisados.
Raiz do erro quadrático médio relativo	(Eq.15) $REQMR = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y_i - x_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{x}}$	REQMR= Raiz do erro quadrático médio relativo (%); y_i = Valores obtidos por simulação; x_i = Valores observados; n = Número de valores analisados; $\bar{x}$ = média dos valores observados.

(PHAM; TRIOLO; SOMMER, 2014)

A REQM e o REQMR, indicadores de desempenho quantitativo, são aplicados no intuito de verificar a precisão, que é uma medida entre o valor predito e o observado, ou a variabilidade total dos erros médios. Os resultados mais próximos de zero indicam melhor desempenho dos modelos de simulação (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011).

3.2.4 Balanço energético

Após os resultados preliminares, foi selecionado o modelo de geometria do biodigestor modelo lagoa coberta que apresentou maior fidedignidade aos valores medidos em campo, a partir da tendência das temperaturas e dos indicadores de desempenho estudados, das temperaturas. As variáveis avaliadas foram selecionadas de forma a possibilitar a compreensão das temperaturas internas em biodigestores e as fontes de calores responsáveis pela manutenção das temperaturas. Desta forma, os ganhos energéticos por radiação solar, por condução e por convecção no biodigestor modelo lagoa coberta nos períodos de verão e inverno foram determinados.

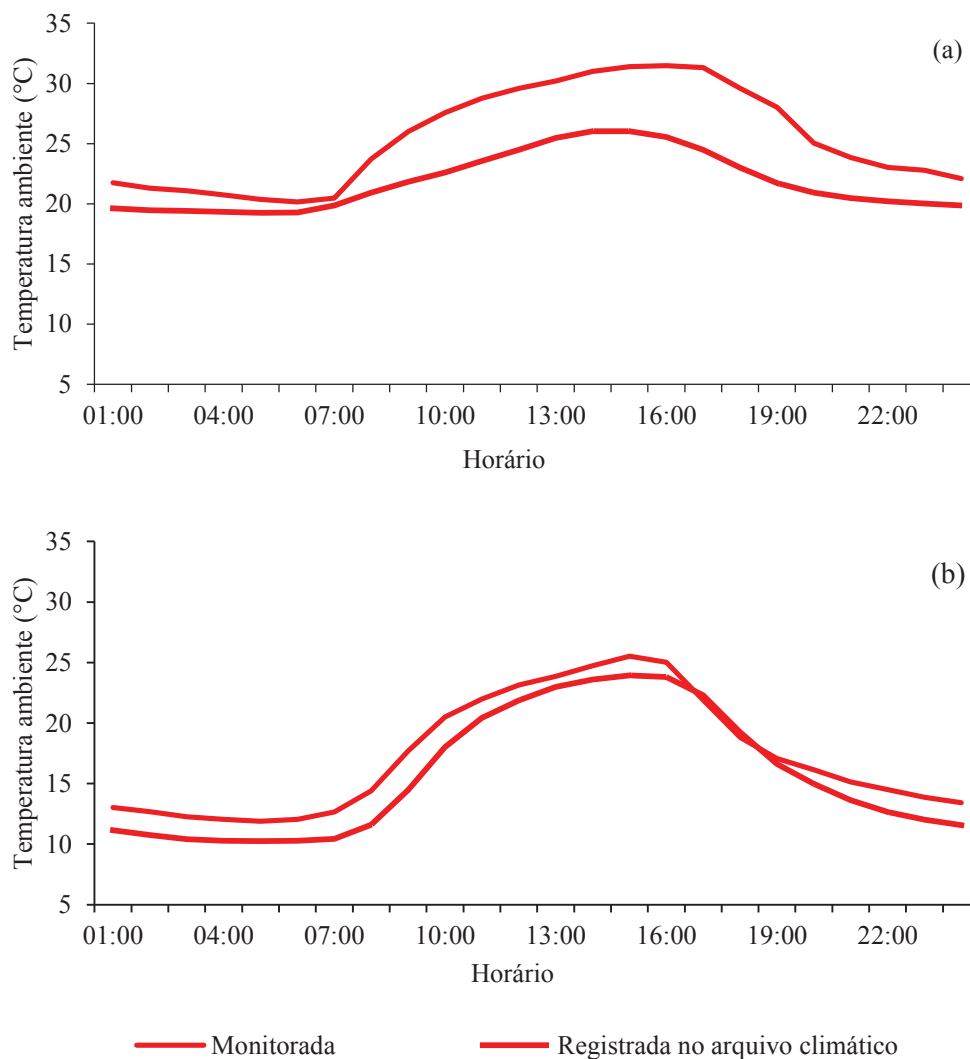
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Comparação das temperaturas simuladas e medidas nos biodigestores

A Figura 3.4 apresenta as variações das temperaturas internas e externas do biodigestor, oriundas do monitoramento (local) e obtidas por meio das simulações com uma e duas zonas térmicas, nos períodos de verão (11 a 30/Jan.) e inverno (11 a 30/Ago.). Como observado, as médias horárias da temperatura ambiente seguiram a mesma tendência da temperatura simulada, entretanto, foram verificadas diferenças de 3,7 (período de verão) e

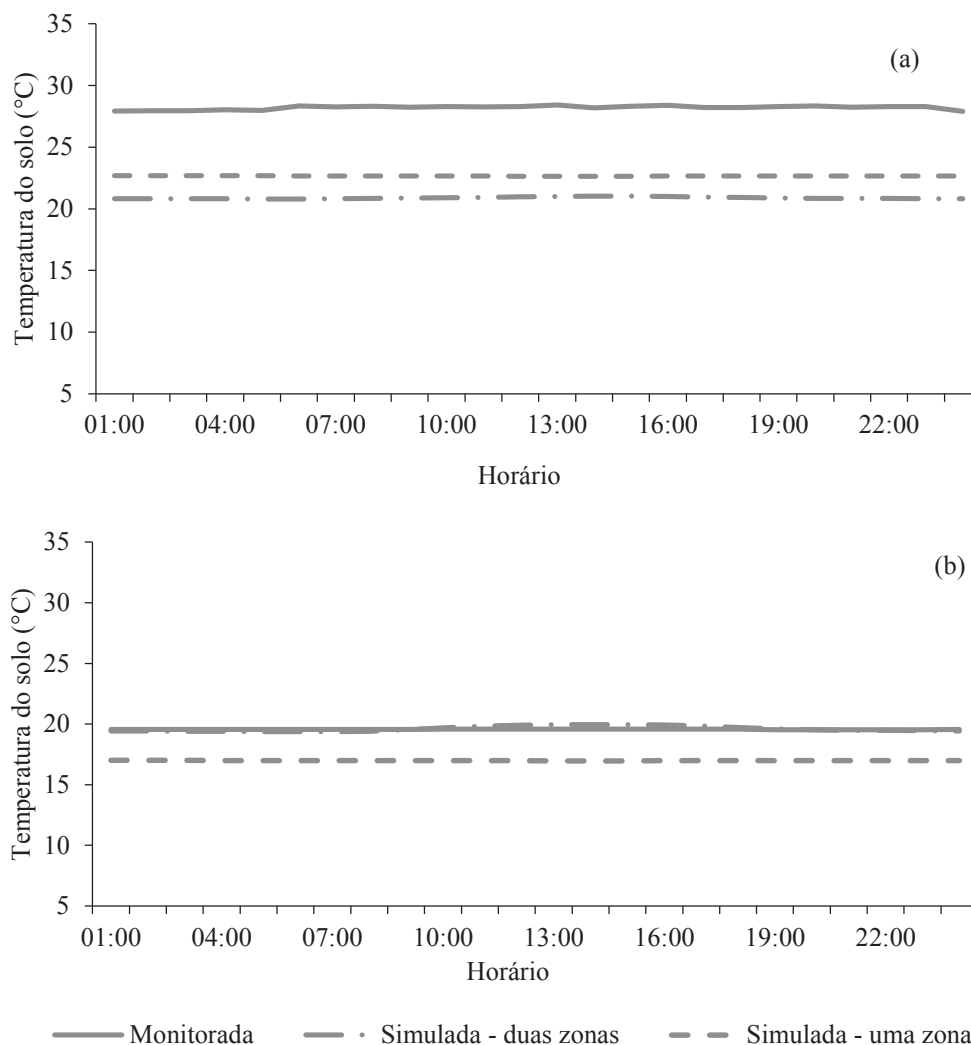
1,54 °C (período de inverno), entre os valores médios diários, decorrentes das diferenças dos dados observados de um ano típico, com o arquivo climático.

Figura 3.4— Variação das temperaturas ambiente, a partir de médias horárias, para dados monitorados e simulados (zona única e duas zonas) nos períodos do verão (a) e inverno (b).



A partir da Figura 3.5-a (período do verão) observa-se que a diferença entre os valores médios diários de temperatura do solo para os dados simulados e observados foi de 5,6 e 7,3 °C, para a simulação com zona única e duas zonas, respectivamente. A mesma avaliação para o período do inverno (Figura 3.5-b) indica valores de 2,6 e 0,04 °C, para a zona única e duas zonas.

Figura 3.5 – Variação das temperaturas do solo a partir de médias horárias, para dados observados e simulados (zona única e duas zonas) nos períodos do verão (a) e inverno (b).



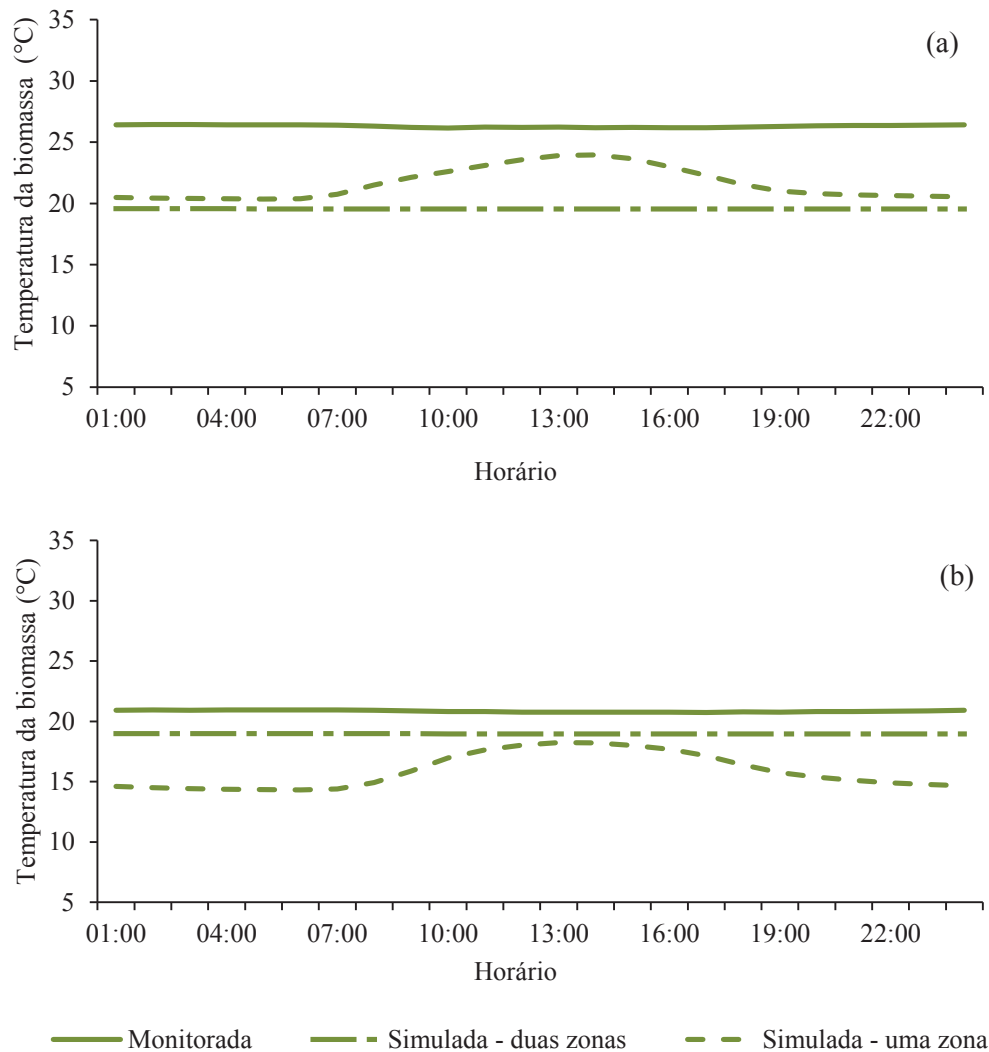
A temperatura do solo simulada e a temperatura do solo observada não apresentaram variações no ciclo diário, visto que o sensor foi instalado a um metro de profundidade, entretanto, obteve-se variação entre o período de verão e inverno. De acordo Hreiz et al. (2017) as variações da temperatura são mais representativas quando avaliadas por períodos maiores de tempo, mensais a anuais. Sousa (2019), avaliando os mesmos biodigestores utilizados neste estudo, em Teixeira-MG, também verificou esse comportamento diário estável, durante um ano de monitoramento, e variações de uma estação para outra, com maior temperatura média (27,9 °C) verificada no mês de janeiro, e menor temperatura (19,8 °C) no mês de julho (inverno). Em Londrina-PR, Oliveira e Borrozzino (2018) avaliaram a temperatura do solo em diferentes profundidades, encontrando diferença de 7,5 °C entre o período de verão (27,5 °C) e inverno (20 °C) à 40 cm de profundidade, e estes relataram ainda que não encontraram diferença significativa em profundidade de 40 e 100 cm.

O solo apresenta grande inércia térmica, que favorece o atraso térmico e a condução de calor, atenuando os picos de temperatura, além do mais as variações de temperatura diminuem com a profundidade, porém pode variar com a umidade do solo (SOUZA; AMPARO; GOMES, 2011).

A simulação da temperatura da biomassa com uma e duas zonas térmicas apresentou temperatura média diária de 21,6 e 19,6 °C para o período de verão, e 15,9 e 19,0 °C para o inverno, enquanto a temperatura observada da biomassa residente apresentava valor médio de 26,3 e 20,9 °C no verão e inverno (Figura 3.6). Vale ressaltar, que a simulação com uma zona térmica fornece a temperatura interna da zona, que consiste em um valor intermediário entre o biogás e a biomassa, que foi adotado para o biogás e biomassa, em termos comparativos, entre observado e medido.

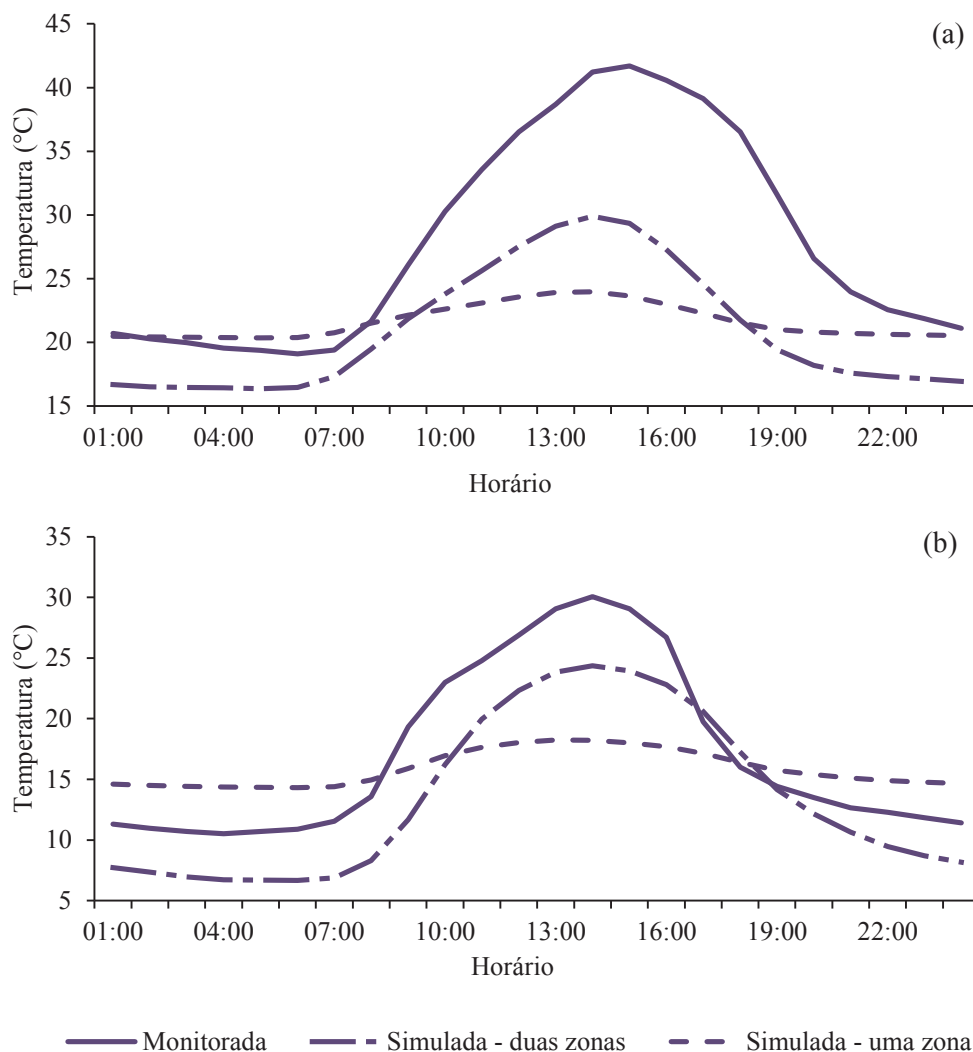
Os dois modelos de simulação apresentaram valores médios próximos entre si, entretanto, a simulação com uma zona térmica apresentou amplitude térmica de 3,9 °C durante o dia, comportamento distinto da temperatura observada da biomassa. Alterações bruscas na temperatura, acima de 2 °C, pode levar a uma taxa abrupta do crescimento microbiano, podendo até ser anulada (CHERNICHARO, 2016; VILLA-MONTOYA; FERRO; OLIVEIRA, 2017), o que retoma a importância da simulação ser coerente ao comportamento das temperaturas internas dos biodigestores. Assim, em termos da tendência da temperatura da biomassa residente no biodigestor, avalia-se que a simulação com duas zonas parece ser mais assertivo, em especial no período de inverno. Sousa (2019), monitorando biodigestores por um período de um ano, verificou que as variações na temperatura da biomassa só ocorrem de forma gradual, e não ultrapassam 2°C ao mês.

Figura 3.6 – Variação das temperaturas da biomassa residente, a partir de médias horárias, para dados observados e simulados (zona única e duas zonas) nos períodos do verão (a) e inverno (b).



A Figura 3.7 apresenta a tendência das temperaturas médias horárias do biogás para o período avaliado. A simulação com uma e duas zonas térmicas obtiveram amplitudes de 3,6 e 13,54 °C para o período de verão, e 3,9 e 17,7 °C para o inverno, enquanto que a biomassa residente observada apresentou amplitudes de 22,6 e 19,5 °C, para verão e inverno.

Figura 3.7– Variação das temperaturas do biogás, a partir de médias horárias, para dados observados e simulados (zona única e duas zonas) nos períodos do verão (a) e inverno (b).



A flutuação diária da temperatura do biogás foi reportada por Hreiz et al. (2017), no qual observaram amplitudes superiores a 10°C. Essa tendência da temperatura do biogás enfatiza que a simulação com duas zonas térmicas apresentam resultados que podem ser utilizados para prever a temperatura dos biodigestores.

A Tabela 3.5 apresenta os resultados dos indicadores de desempenho das diversas temperaturas simuladas, tendo-se como base as respectivas temperaturas obtidas no monitoramento dos biodigestores. A avaliação foi realizada comparando-se os períodos de verão e inverno e os dois modelos de simulação.

Tabela 3.5 – Indicadores de desempenho para diferentes perfis de temperaturas ao se considerar os períodos de verão e inverno e zona térmica única e dupla no interior dos biodigestores.

		2 zonas		1 zona	
		Verão	Inverno	Verão	Inverno
Temperatura do solo	REQM (°C)	7,3	0,2	4,9	5,2
	REQMR (%)	26,0	1,1	18,6	25,0
Temperatura da biomassa residente	REQM (°C)	6,8	1,9	4,9	5,2
	REQMR (%)	25,7	9,0	18,6	25,0
Temperatura biogás	REQM (°C)	8,1	4,2	9,5	5,7
	REQMR (%)	29,0	24,6	34,0	33,1
Temperatura ambiente	REQM (°C)	4,1	1,75	4,1	1,8
	REQMR (%)	16,2	10,1	16,2	10,1

REQM: Raiz do erro quadrático médio; REQMR: Raiz do erro quadrático médio relativo.

Em linhas gerais, observa-se que no período do inverno, para ambas as zonas térmicas avaliadas, os resultados foram mais próximos dos dados obtidos no monitoramento, em comparação ao período do verão. Tendo esse período como base, a simulação com duas zonas térmicas apresentou melhor desempenho, visto que de modelo geral, no inverno, a REQM e REQMR estiveram mais próximos de zero.

No período de verão as diferenças já observadas desde a temperatura ambiente, que é independente do desenho da geometria, repercutiram em maiores erros. Na simulação com uma zona térmica, como comentado anteriormente, a temperatura interna é tida como homogênea, resultando em um valor intermediário entre a temperatura da biomassa residente e do biogás.

Como temperatura do biogás apresenta valores médios maiores que a da biomassa, conseqüentemente, na simulação com uma zona térmica é observada uma elevação da temperatura interna em comparação com a temperatura da biomassa na simulação com duas zonas, o que repercutiu em menores erros da simulação com uma zona, no verão. A simulação da temperatura interna com uma zona térmica no verão em comparação com a temperatura do biogás da simulação com duas zonas, também, apresentou menor erro o que remete a um melhor desempenho da simulação com uma zona.

Entretanto, tendo como base o comportamento da temperatura do biogás medido, como observado na Figura 3.7-b, é possível observar que a simulação com duas zonas subestimou a temperatura medida na maior parte dos pontos, o que pode ser associado às diferenças do arquivo climático. A simulação com uma zona térmica omitiu o comportamento diário horário da temperatura do biogás, atestado por maiores erros observados.

Assim, como de modo geral o modelo de simulação com duas zonas térmicas apresentou mais fidedignamente ao comportamento das temperaturas internas, medidas em campo, principalmente considerando o desempenho estatístico no período frio, esse modelo, com duas zonas térmicas, foi selecionado para prosseguir com a avaliação das trocas térmicas, no período de verão (com solo saturado) e inverno (com solo seco).

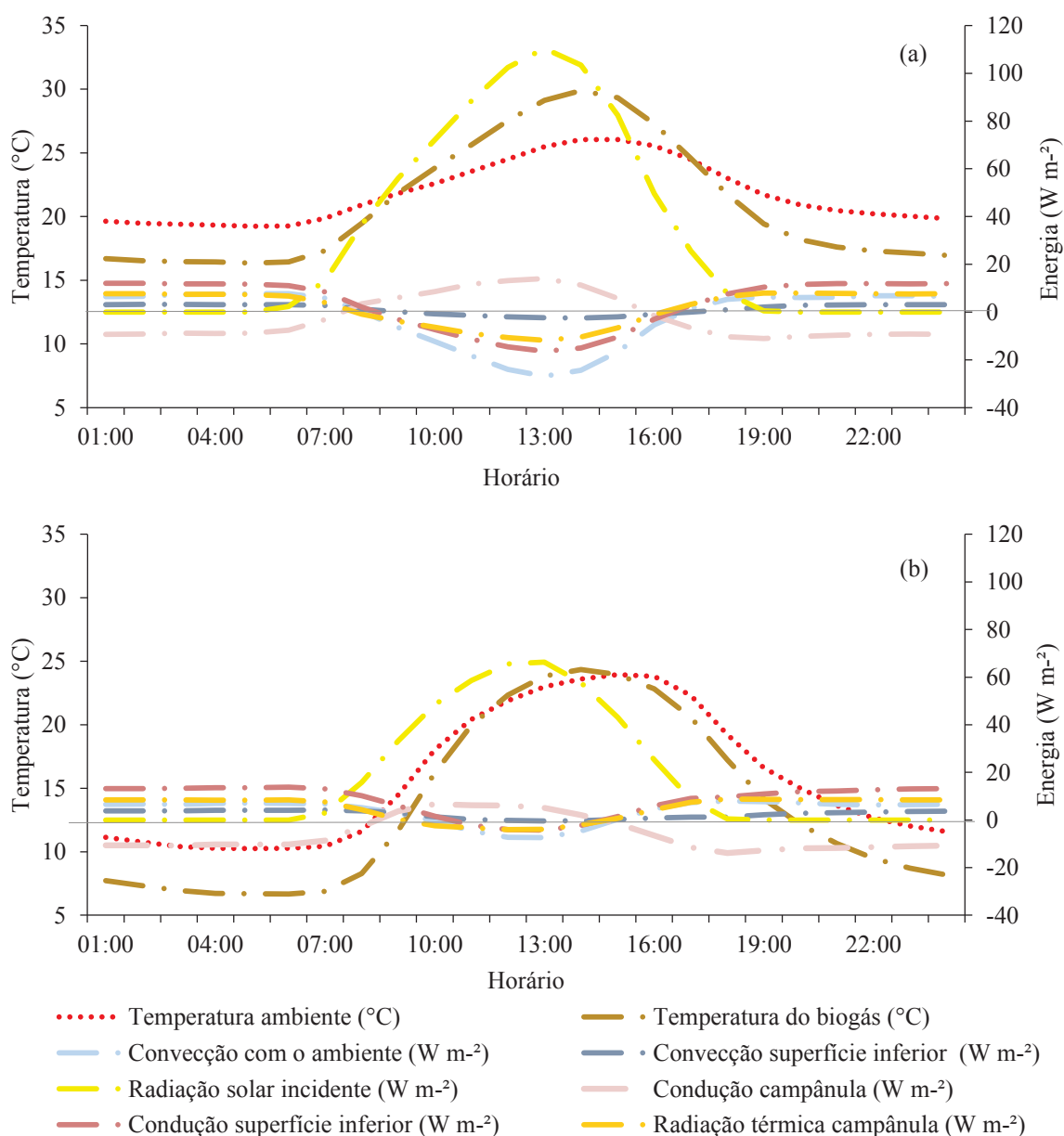
3.3.2 Balanço energético do modelo com duas zonas térmicas

3.3.2.1 Balanço energético do modelo com duas zonas térmicas

A partir dos melhores resultados apresentados para o ambiente interno, considerando-se duas zonas térmicas, foi realizado o balanço energético detalhado desta configuração. Na simulação com duas zonas térmicas, a zona superior, onde se concentra o biogás, está exposta a ganhos e perdas energéticas por convecção, condução e, sobretudo radiação. Já a zona inferior, na qual foi simulada a massa interna referente à biomassa residente, não sofre diretamente ganho energético por radiação solar incidente, e a temperatura interna é controlada especialmente pelas trocas térmicas com o solo, por meio da condução.

As médias horárias, em um dia, dos resultados das simulações da temperatura interna do biodigestor referente ao biogás, a temperatura do ar externo, assim como os ganhos e perdas energéticas por radiação, condução e convecção estão apresentadas na Figura 3.8 para o período de verão (11 a 30/Jan.) e período de inverno (11.jul a 30/Jul.) .

Figura 3.8 – Médias horárias das temperatura ambiente e do biogás, assim como os ganhos energéticos por radiação, condução e convecção na zona térmica superior (biogás) em biodigestor BLC nos períodos do verão (a) e do inverno (b).



Superfície inferior: superfície de separação entre a zona do biogás e da biomassa residente, superfície inferior a zona 2 (biogás).

O ganho por radiação solar incidente na superfície varia ao longo do dia. Durante a noite a radiação solar é ausente, e a radiação térmica constante, consequentemente a temperatura interna permanece estável no período noturno. Com o nascer do sol, a radiação aumenta, fornecendo energia para o biodigestor, elevando a temperatura do biogás até 29,9 °C no verão (Figura 3.8). Com o aumento da radiação solar incidente, o biodigestor para de perder calor para o meio externo e começa a ganhar calor, por meio da condução, entretanto

com o aumento da radiação solar na campânula, a manta plástica passar a emitir radiação térmica infravermelha (valores negativos) para o meio externo.

A elevação da temperatura da campânula do biogás, devido à radiação solar, provocou perda de energia para o ambiente, por meio da convecção, de até 16,3 kW. Pequenas perdas por convecção também foi observada entre a superfície de separação das zonas térmicas e a biomassa residente (Figura 3.8).

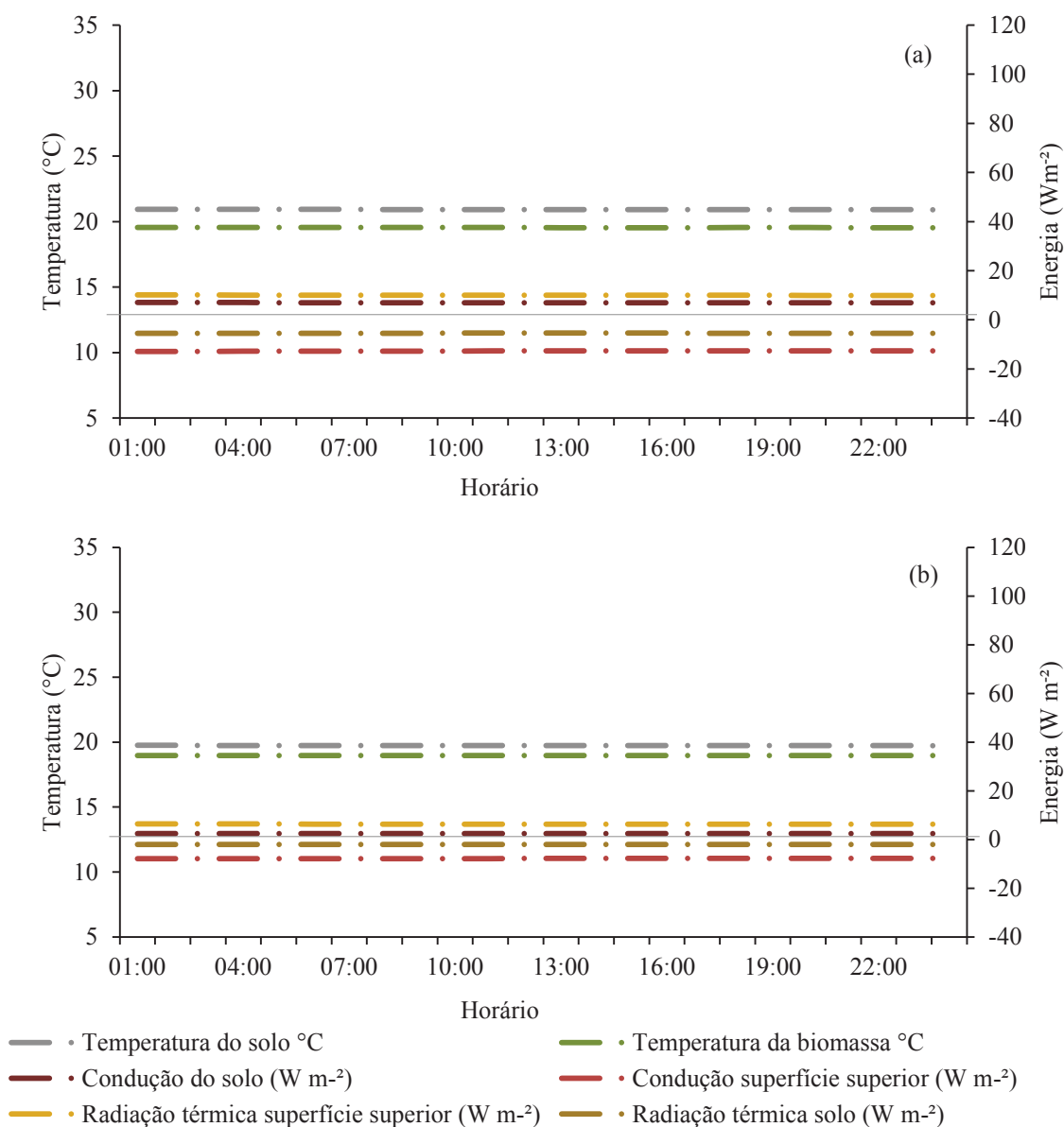
Como dito, o biogás é aquecido devido à temperatura ambiente e à radiação no topo da campânula. O biogás por sua vez possui baixa inércia e então é regido pela radiação que, depois de aquecido, aquece a biomassa residente, por convecção (PERRIGAULT et al., 2012) e, nesse modelo, também por condução, o que é uma limitação do modelo em relação à realidade. Como verificado em outros estudos, a radiação solar na campânula do biodigestor e a temperatura do ambiente externo são os fatores que mais influenciam a temperatura interna do biodigestor (BAVUTTI et al., 2014).

Os ganhos energéticos no verão pela radiação solar durante dias quentes podem ocasionar maior temperatura do biogás e da campânula. Assim, diferente da temperatura da biomassa residente, a temperatura do biogás e da campânula sofrem variações diárias e sazonais (HREIZ et al., 2017).

No período de verão (Figura 3.8-a) a temperatura do biogás durante o dia ultrapassou em até 3,9 °C, a temperatura ambiente, com pico, próximo das 14h, enquanto que no inverno (Figura 3.8.b), essa diferença se limitou a 0,9, próximo das 13h. Esse comportamento deve-se aos ganhos de radiação solar, onde no verão foi observado maior pico de radiação. Entretanto, durante a noite a temperatura do biogás esteve abaixo da temperatura ambiente em até 3,6 °C. Este comportamento da temperatura do biogás ao longo do ciclo diário também foi observado por Sousa (2019) e Hreiz et al. (HREIZ et al., 2017). O abaixamento da temperatura do biogás, no período noturno, é, em grande parte, decorrente das perdas por meio da convecção entre a campânula e o ambiente, além das perdas de energia por condução do biogás para o ambiente, por meio da campânula, decorrente da queda de temperatura do ambiente em até 13,7 °C.

As médias horárias dos resultados das simulações da temperatura interna do biodigestor referente à biomassa residente, a temperatura do solo, assim como os ganhos e perdas energéticas por condução estão apresentadas na Figura 3.9, para o período de verão e inverno.

Figura 3.9 – Médias horárias das temperaturas do solo e da biomassa residente, assim como os ganhos energéticos por condução e radiação, na zona térmica inferior (biomassa residente), em biodigestor BLC nos períodos do verão (a) e inverno (b).



V: verão; I: inverno; Superfície superior: superfície de separação entre a zona da biomassa (zona 1) residente e biogás, superfície superior a zona 1 (biomassa residente)

Os biodigestores modelo lagoa coberta são escavados no chão e impermeabilizados por mantas plásticas. A propriedade da inércia do solo reduz os picos diários de temperatura, e ocasiona amortecimento na condução (SOUZA; AMPARO; GOMES, 2011), resultando em temperaturas menores em comparação com o ar ambiente (MARZAROTTO et al., 2015).

Os ganhos energéticos da biomassa residente ocorreram por meio da condução entre o solo as paredes do biodigestor, apresentando valores médios muito próximos no período de verão (4,5 kW) e inverno (2,1 kW). Quanto à radiação térmica, foi observado ganho

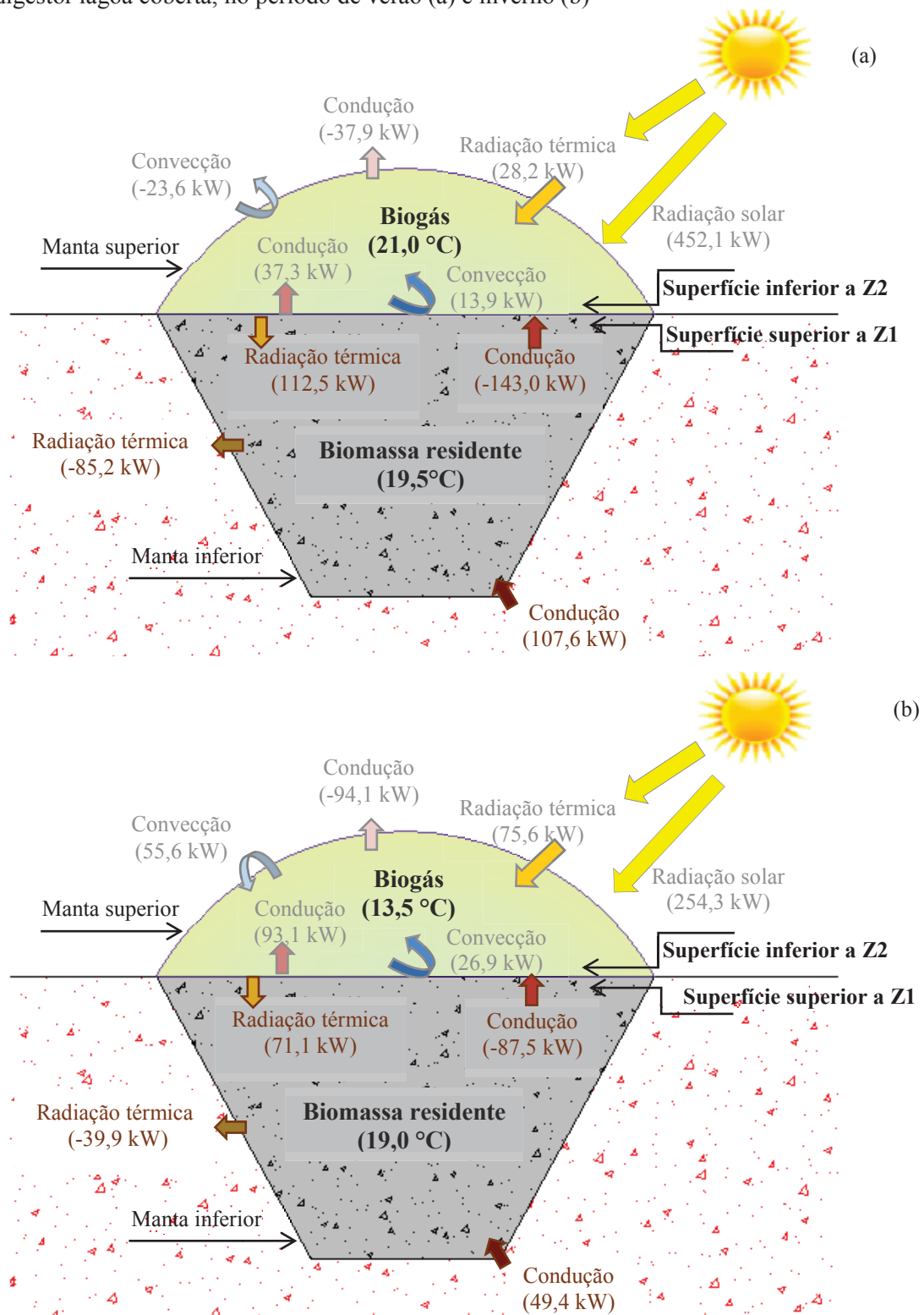
energético médio de 4,7 (verão) e 3,0 (inverno) kW através da superfície superior que está em contato com o biogás, e perda de 3,6 (verão) e 1,7 (inverno) kW para o solo. Também foi observada perda horária, em média, de 6,0 (verão) e 3,6 (inverno) kW de energia em média, por meio da condução entre a biomassa e o biogás através da superfície de contato entre uma zona e outra.

Esse modelo de biodigestor é escavado no chão no intuito de atingir temperatura estável da biomassa residente (PHAM et al., 2014). Assim, a temperatura biomassa residente no digestor circundado pelo solo, é equilibrada nos diferentes horários e estações, decorrentes da propriedade da inércia do solo. A biomassa residente apresentou temperatura média de 19,5 °C no verão (Figura 3.9-a) e 19,0 °C no inverno (Figura 3.9-b). Como pôde ser observado, a temperatura da biomassa segue o mesmo comportamento do solo, e essa não apresentou grandes variações entre o período de verão (Figura 3.9-a) e inverno (Figura 3.9-b), com média de 20,9 e 19,6 °C respectivamente. Em biodigestores BLC, sem aquecimento, o nível recomendado seria dentro da faixa mesófila (20 a 40 °C) (CHERNICHARO, 2016).

A inércia térmica na biomassa em biodigestores semienterrados também foi verificada no trabalho de Heiz et al. (2017), eles apontaram que ao atingir o regime de equilíbrio da biomassa residente, variações como temperatura ambiente ou velocidade do vento pouco alteram as trocas térmicas em um ciclo diário e apenas condições climáticas pode provocar alterações mais representativas em torno no estado estacionário da biomassa residente.

Adicionalmente a Figura 3.10 apresenta um resumo representativo dos ganhos e perdas energéticas do biodigestor BLC.

Figura 3.10 – Representação das trocas térmicas, por meio de sob a influência de duas zonas térmicas no biodigestor lagoa coberta, no período de verão (a) e inverno (b)



Superfície superior a z1 e Inferior a z2: Superfície de separação entre a zona do biogás (z2) e a zona da biomassa residente (z1)

No período de verão (Figura 3.10-a), período de maior incidência solar incidente, o biodigestor recebeu 452,1 kW de energia por radiação solar, contra 254,3 kW no período de inverno (Figura 3.10-b). A campanula do biodigestor (manta superior) apresenta menor temperatura no inverno, e logo, maior ganho por radiação térmica foi observada no período de inverno (28,2 kW). Além da radiação solar incidente e radiação térmica, a parte superior do biodigestor, onde contém o biogás, sofre influência da condução e convecção. Quando a campanula aquece pela radiação solar essa torna mais quente que o ambiente e ocorrendo uma perda de energia para o ambiente por meio da condução, especialmente no inverno onde a temperatura do ar é amena.

No período de inverno foi observado maior ganho energético por meio da condução entre o biogás e a parte superficial da biomassa residente, visto que a temperatura do biogás sofre grande queda de temperatura no horário noturno, especialmente no período inverno. A biomassa, porém, permanece com temperatura similar nos períodos de inverno e verão.

A convecção, no verão (Figura 3.10-a), fornece energia térmica ao biodigestor durante período da noite, mas durante o dia há uma grande perda por convecção visto que a temperatura do biogás supera a temperatura ambiente no horário por volta das 14 horas (Figura 3.8-a), resultando em uma perda de -23,6 kW. Entretanto, no período de inverno (Figura 3.10-b), de modo geral, a temperatura do biogás fica quase sempre inferior a temperatura do ambiente resultando em um ganho positivo de energia por convecção com o ambiente de 55,6 kW. Devido à geometria do desenho exige, para separação das zonas, a adição de uma superfície de separação entre o biogás e a biomassa. O programa fornece, então, trocas por convecção entre o biogás e a parte superficial da biomassa (superfície inferior ao biogás), como a temperatura da biomassa devido a inércia do solo permanece constante com poucas variações, o biogás ganha energia por convecção especialmente no inverno onde o biogás sofre maiores oscilações.

Na zona inferior do biodigestor (da biomassa residente) as trocas térmicas ocorrem basicamente por condução e radiação térmica, e decorrente da inércia do solo não sofrem alterações horárias durante o dia. O solo fornece energia à biomassa por meio da condução, no verão são observadas ganho energético de 107,6 kW e no inverno 49,4 kW, visto que o solo no período de verão possui maiores temperaturas. Ganhos energéticos também são observados através da radiação térmica advinda da parte superior do biodigestor, onde foram observados 112,5 kW no verão e 71,1 kW no inverno. Entretanto, perdas por condução foram observadas da biomassa para a parte superior da biomassa que também foram maiores no verão de -

143,0kW, contra -87,5 kW no inverno, e perdas por meio da radiação térmica entre a biomassa e o biodigestor, de -85,2 kW no verão e -39,9 kW no inverno.

No período de verão são observadas maiores temperaturas internas aos biodigestores, visto que nesse período são observados maiores taxas de radiação solar. No verão (Figura 3.10-a) a radiação solar foi responsável por 76,9 % dos ganhos energéticos do ambiente externo, contra 58,5% no inverno (Figura 3.10-b). Vaz (2019), em simulação de BLC com única zona térmica, encontrou ganhos por radiação solar de 84,0 e 76,0 % para o verão e inverno, respectivamente, e observou ainda que as maiores perdas. No verão as perdas do biodigestor foram majoritariamente para o solo, quanto que no inverno foram pela cúpula do biodigestor.

De acordo Casarin (2016) em BLC não aquecidos as perdas de calor ocorrem pela entrada de efluente e pelo solo, já os ganhos são oriundos do ambiente por meio da cúpula. Vaz (2019) constatou que os BLC sem sistema de aquecimento, são dependentes principalmente das variações climáticas. A autora observou que no período de inverno, a redução da temperatura ambiente resulta em queda da temperatura interna do biodigestor, o implica em possíveis fluxos de calor através do biodigestor para o ambiente, através da cúpula do biodigestor. A temperatura do biodigestor é significativamente influenciada pela temperatura do ar ambiente e do solo, variações de acordo as estações do ano (PHAM et al., 2014).

3.4 CONCLUSÕES

O modelo de simulação com geometria contendo duas zonas térmicas apresentou mais fidedignamente os comportamento das temperaturas internas do biodigestor modelo lagoa coberta, especialmente no inverno. Os resultados deste modelo de simulação nesse trabalho permitiram avaliar separadamente a temperatura do substrato e do biogás, os quais apresentam comportamentos distintos, fornecendo informações importantes para a avaliação da temperatura de digestão e das trocas térmicas da construção do biodigestor com o meio circunvizinho.

A temperatura do biogás apresentou comportamento similar à temperatura ambiente, a qual é influenciada pela condução, convecção, radiação térmica e, sobretudo da radiação solar, que resulta em altas amplitudes diárias da temperatura de biogás.

O comportamento da temperatura da biomassa residente, em biodigestores semienterrados como o modelo lagoa coberta, reforçou a grande inércia térmica da biomassa

residente, apresentando temperatura com comportamento constante, similar ao solo, o qual fornece energia a biomassa por meio de condução.

3.5 REFERÊNCIAS

- BAVUTTI, M. et al. Thermal stabilization of digesters of biogas plants by means of optimization of the surface radiative properties of the gasometer domes. **Energy Procedia**, v. 45, p. 1344–1353, 2014.
- CASARIN, M. A. **Microgeração distribuída de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos: uma contribuição para a sustentabilidade da suinocultura**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores anaeróbios**. 2 ed ampl ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.
- ELI, L. G. et al. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus**. Florianópolis, SC - Brazil: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2019.
- FERNANDES FILHO, A. C.; SANTANA, C. O. S.; GATTAMORTA, M. A. Utilização de biodigestores para geração de energia elétrica a partir de dejetos de suínos no Brasil. **Inovae**, v. 6, p. 67–84, 2018.
- FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, n. November 2018, p. 146–157, 2019.
- HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011.
- HASSANEIN, A. A. M. et al. Simulation and validation of a model for heating underground biogas digesters by solar energy. **Ecological Engineering**, v. 82, p. 336–344, 2015.
- HREIZ, R. et al. Modeling and simulation of heat transfer phenomena in a semi-buried anaerobic digester. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 119, p. 101–116, 2017.
- KHANAL, S. K.; TIRTA NINDHIA, T. G.; NITAYAVARDHANA, S. Biogas From Wastes: Processes and Applications. In: **Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches**. [s.l.] Elsevier B.V., 2019. p. 165–174.
- LIU, Y. et al. Investigation on the heat loss characteristic of underground household biogas digester using dynamic simulations and experiments. **Biosystems Engineering**, v. 163, p. 116–133, 2017.
- LIU, Y. et al. Two-step heating mode with the same energy consumption as conventional heating for enhancing methane production during anaerobic digestion of swine wastewater.

Journal of Environmental Management, v. 209, p. 301–307, 2018.

MARZAROTTO, C. et al. Análise numérica da influência de parâmetros operacionais e construtivos no funcionamento de trocadores de calor solo-ar. **Scientia Plena**, v. 11, n. 8, p. 11, 2015.

MIRTSOU-XANTHOPOULOU, C.; SKIADAS, I. V.; GAVALA, H. N. On the effect of aqueous ammonia soaking pre-treatment on continuous anaerobic digestion of digested swine manure fibers. **Molecules**, v. 24, n. 13, 2019.

NSAIR, A. et al. Optimizing the performance of a large scale biogas plant by controlling stirring process : A case study. **Energy Conversion and Management**, v. 198, n. August, p. 111931, 2019.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. London: Methuen e Co. Ltd, 1987.

OLIVEIRA, D. DE; BORROZZINO, E. Temperatura do solo sob três condições de cobertura em Londrina, Paranavaí e Guarapuava, no estado do Paraná. **Agrometeoros**, v. 26, n. 1, p. 131–137, 2018.

PERRIGAULT, T. et al. Bioresource Technology Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates : A heat transfer model. **Bioresource Technology**, v. 124, p. 259–268, 2012.

PHAM, C. H. et al. Factors Affecting Process Temperature and Biogas Production in Small-scale Rural Biogas Digesters in Winter in Northern Vietnam. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 27, n. 7, p. 1050–1056, 2014.

PHAM, C. H.; TRIOLO, J. M.; SOMMER, S. G. Predicting methane production in simple and unheated biogas digesters at low temperatures. **Applied Energy**, v. 136, p. 1–6, 2014.

RESENDE, B. C.; SOUZA, H. A. DE; GOMES, A. P. Modelagem da transferência de calor de ambientes subterrâneos no programa de simulação EnergyPlus. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 161–180, 2019.

SHEETS, J. P. et al. Beyond land application: Emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste. **Waste Management**, v. 44, p. 94–115, 2015.

SOUSA, I. DE P. **Estudo do potencial energético e das variáveis do processo em biodigestores anaeróbios modelo lagoa coberta**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2019.

SOUZA, H. A. DE; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em light steel framing. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 113–128, 2011.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Input Output Reference. **US. Documentation**, v. EnergyPlus, p. 1–2796, 2016.

VAZ, P. N. **Simulação de biodigestor de fluxo tubular com e sem sistemas de recirculação e aquecimento**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2019.

VILLA-MONTOYA, A. C.; FERRO, M. I. T.; OLIVEIRA, R. A. DE. Removal of phenols and methane production with coffee processing wastewater supplemented with phosphorous. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 1, p. 61–74, 2017.

WANG, F.; ZHANG, C.; HUO, S. Influence of fluid dynamics on anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Environmental Technology**, v. 38, n. 9, p. 1160–1168, 2017.

XING, L. U. **Estimations of Undisturbed Ground Temperatures Using Numerical and Analytical Modeling**. [s.l.] Oklahoma State University, 2014.

XU, F. et al. Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 247, n. July 2017, p. 1047–1058, 2018.

YANG, L. et al. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 1133–1152, 2014.

4 CONCLUSÃO GERAL

O monitoramento de plantas de biogás em escala plena possibilitou, neste estudo, o aprimoramento de estimativas de produção de biogás e de modelos de simulação das temperaturas e trocas térmicas em biodigestores modelo lagoa cobertas, fornecendo informações concisas para auxílio na projeção de biodigestores.

De modo geral, entre os modelos matemáticos originais avaliados para a estimativa de metano, o modelo de Chen-Hashimoto apresentou melhor desempenho qualitativo, por sua vez, após ajustes o modelo da CETESB ajustado se destacou.

O estudo de modelos matemáticos para estimativas de metano, com banco de dados de monitoramento de granja suinícola, possibilitou a recomendação e ajustes de modelos matemáticos que podem ser eficientemente aplicados em projetos de biodigestores, viabilidade de aproveitamento de biogás e monitoramento de sistemas operacionais de biodigestores lagoa coberta.

Modelos de simulação de trocas térmicas em biodigestores modelo lagoa coberta com duas zonas térmicas, de modo geral, apresentaram melhor desempenho, e fidedignidade as temperaturas do biogás e biomassa residente em biodigestores modelo lagoa coberta. Esse modelo de desenho de geometria no *Energy Plus*, demonstrou que a temperatura do biogás apresenta comportamento similar à temperatura ambiente, com grande influência da radiação solar. A biomassa residente segue o comportamento estável da temperatura, fornecendo informações importantes para projetos de biodigestores semienterrados como o modelo lagoa coberta.

4.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se para trabalhos futuros:

- ✓ Caracterizar a biodegradabilidade do lodo em biodigestores anaeróbios em suinoculturas.
- ✓ Medir a produção direta de biogás em granjas de suinocultura.
- ✓ Medir regularmente a vazão dos efluentes.
- ✓ Validar os modelos matemáticos, avaliando os modelos matemáticos e de simulação submetidos a condições diferentes das utilizadas para verificação dos dados.

- ✓ Editar o arquivo climático com dados de temperaturas medidas nos locais de instalação dos biodigestores utilizados para verificação.