

IZABELLE DE PAULA SOUSA

**ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO E DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO EM
BIODIGESTORES ANAERÓBIOS 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
Paulo Roberto Cecon

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2019**

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

S725e
2019 Sousa, Isabelle de Paula, 1990-
Estudo do potencial energético e das variáveis do processo
em biodigestores anaeróbios modelo lagoa coberta / Isabelle de
Paula Sousa. – Viçosa, MG, 2019.
66f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

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

1. Biodigestores. 2. Digestão anaeróbia. 3. Suínos - Criação.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

CDD 22 ed. 665.776

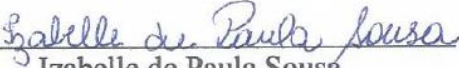
IZABELLE DE PAULA SOUSA

**ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO E DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO
EM BIODIGESTORES ANAERÓBIOS 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: 26 de julho de 2019.

Assentimento:



Izabelle de Paula Sousa
Autora



André Pereira Rosa
Orientador

“Sonhe com aquilo que você quer ser,
porque você possui apenas uma vida
e nela só se tem uma chance
de fazer aquilo que quer.
Tenha felicidade bastante para fazê-la doce.
Dificuldades para fazê-la forte.
Tristeza para fazê-la humana.
E esperança suficiente para fazê-la feliz...
... A felicidade aparece para aqueles que choram.
Para aqueles que se machucam
Para aqueles que buscam e tentam sempre.
E para aqueles que reconhecem
a importância das pessoas que passaram por suas vidas”.

Clarice Lispector

AGRADECIMENTOS

A Deus e a nossa senhora, por ter me dado força, esperança, e sabedoria para não desanimar e por me proporcionar a finalização de mais uma etapa importante na minha vida.

Ao meu orientador prof. Dr. André Rosa, por todos ensinamentos, pela confiança, paciência, apoio, contribuições e oportunidades que me proporcionou ao longo desta trajetória.

Aos meus coorientadores Alisson Borges e Paulo Cecon, pela coorientação e por todos ensinamentos ao longo desta trajetória.

Aos meus pais, Ivan e Milene, as minhas irmãs Marielle e Emanuelle e aos meus avós Luzia e José, pela base, carinho e por sempre me apoiarem, incentivarem, me deram força para prosseguir. Sem vocês não chegaria até aqui.

Ao meu namorado Filipe, que durante esta caminhada sempre esteve presente ao meu lado fornecendo amor, carinho, confiança, apoio, incentivo e por acreditar que eu seria capaz.

Aos alunos de iniciação científica, Matheus e Nathalia, pelo comprometimento e dedicação com o desenvolvimento da pesquisa.

Ao grupo Bioenergia, em especial ao Baltazar, Robson e Petterson, por sempre estarem dispostos em colaborar com a pesquisa.

Aos técnicos Simão, Dilson, Mauricio pela colaboração ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Luciano dono da Granja Panorama, por abrir as portas do seu empreendimento para a realização desta pesquisa e por toda hospitalidade. Ao Bibi, funcionário da granja, por sempre estar disposto a contribuir com esta pesquisa.

À minha família, em especial à todas as minhas tias, a minha madrinha e a Ângela que me apoiam e incentivam a correr atrás dos meus sonhos.

Aos meus amigos de longa data Roberta, Yasmine, Priscila, Jaqueline, Francielle, Daniela, Paulo, Fabiola e Sandra, que mesmo de longe fazem grande diferença na minha vida.

Às minhas amigas Fernanda e Adelaide, pelo convívio, apoio nos momentos de desespero e também de alegria. Por compartilhar juntas esta etapa que nem sempre foi fácil.

Aos membros do Laboratório de Qualidade Ambiental (LQA) e do Centro de Referência em Recursos Hídricos (CRRH), em especial, Tayane, Juciara e David por toda amizade, paciência e por sempre estarem dispostos a me ajudar.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade dos estudos.

Aos membros da banca pela disponibilidade e contribuições para aprimorar este estudo.

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

E a todos que de forma direta ou indireta participaram da execução deste estudo, o meu muito obrigada!

BIOGRAFIA

IZABELLE DE PAULA SOUSA é filha de Milene Aparecida de Paula Sousa e Ivan Luiz de Sousa, irmã de Marielle de Paula Sousa e Emanuelle de Paula Sousa. Nasceu em 03 de novembro de 1990, na cidade de Sete Lagoas, Minas Gerais.

Em março de 2012, iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Minas Gerais, MG, realizou intercâmbio no período de setembro de 2016 a janeiro de 2017 no Instituto politécnico de Bragança, Portugal. Concluiu a graduação em julho de 2017.

Em agosto de 2017, ingressou no programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em nível de mestrado na área de Recursos Hídricos, submetendo-se à defesa em julho de 2019.

RESUMO

SOUSA, Izabelle de Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2019. **Estudo do potencial energético e das variáveis do processo em biodigestores anaeróbios modelo lagoa coberta.** Orientador: André Pereira Rosa. Coorientadores: Alisson Carraro Borges e Paulo Roberto Cecon.

Este estudo teve como objetivo (i) estimar o potencial energético proveniente de suinoculturas de diferentes portes no estado de Minas Gerais; e (ii) avaliar a influência entre as temperaturas no interior e exterior do biodigestor com a remoção da matéria orgânica e as tendências típicas das temperaturas em diferentes períodos do ano. (i) O potencial energético de Minas Gerais foi estimado a partir do volume de esterco gerado por fase de criação dos animais e condições reais de geração de eletricidade a partir da operação de sistemas de moto-geração. Os dados do plantel de suínos para o estado foram obtidos junto ao IMA. Constatou-se que as mesorregiões Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Zona da Mata são os maiores polos suinícolas de Minas Gerais, sendo responsáveis por concentrar o maior número de granjas e de animais. Obteve-se que a potência elétrica total no estado foi igual a 31MW, enquanto que a potência atual correspondeu a 20 MW. No que tange a potência instalada outorgada, o valor ainda é reduzido, sendo 35,4% da potência atual, o que prediz que nem todas as mesorregiões produtoras de suínos que possuem biodigestores instalados fazem o aproveitamento energético do biogás. (ii) A influência e relação das temperaturas sobre a eficiência do processo de tratamento foi avaliada a partir do monitoramento realizado em uma suinocultura localizada no município de Teixeiras, MG. O monitoramento foi realizado a partir da instalação de sensores na área experimental para a aferição das temperaturas do biogás, substrato, solo, ambiente e efluente, além de coletas do efluente (entrada e saída) realizadas semanalmente. A partir do monitoramento, a eficiência de remoção de DQO apresentou valor médio igual a 40,6% para o período do verão e 36,8% para o inverno. Para os valores de sólidos não observaram variações consideráveis entre a entrada e saída do sistema. Observou-se uma maior variação térmica na temperatura ambiente e do biogás. No período verão/inverno observou-se que no verão a temperatura do solo foi superior a temperatura do substrato e que no inverno o comportamento das temperaturas são o oposto. Constatou-se que todas as temperaturas monitoradas se correlacionam linearmente, apresentando r acima de 0,8. No entanto, quando se associa as temperaturas com a eficiência de remoção de DQO, observa-se que não há uma correlação linear entre elas. Contudo, nota-se uma maior

associação com as temperaturas do substrato (0,42), seguida das temperaturas do biogás (0,36), solo (0,31) e ambiente (0,16). Em resumo, o sistema anaeróbio monitorado está operando com eficiência de remoção da matéria orgânica abaixo do esperado. No entanto, observou-se que a temperatura do substrato nos dois períodos, verão e inverno, foi inferior a temperatura ótima para os microrganismos anaeróbios. E que a temperatura do substrato apresenta uma maior correlação com a temperatura do solo.

Palavras-chave: Biodigestor canadense. Digestão anaeróbia. Suínos

ABSTRACT

SOUSA, Izabelle de Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2019. **Study of energy potential and process variables in covered lagoon anaerobic digesters.** Advisor: André Pereira Rosa. Co-advisors: Alisson Carraro Borges and Paulo Roberto Cecon.

The objective of this study was (i) to estimate the energy potential from pig farms of different sizes in the state of Minas Gerais; and (ii) evaluate the influence between the temperatures inside and outside the biodigester with the removal of organic matter and the typical temperature trends at different times of the year. (i) The energy potential of Minas Gerais was estimated from the volume of manure generated by the animal husbandry phase and the actual conditions of electricity generation from the operation of motorcycle generation systems. The pig herd data for the state were obtained from the IMA. It was found that the Triângulo Mineiro / Alto Paranaíba and Zona da Mata mesoregions are the largest swine hubs in Minas Gerais, being responsible for concentrating the largest number of farms and animals. The total electric power in the state was 31MW, while the current power corresponded to 20 MW. Regarding the installed power granted, the value is still low, being 35.4% of the current power, which predicts that not all pig producing mesoregions that have installed biodigesters make the energy use of biogas. (ii) The influence and relationship of temperatures on the efficiency of the treatment process was evaluated from the monitoring performed in a swine production located in Teixeiras, MG. Monitoring was carried out from the installation of sensors in the experimental area to measure biogas, substrate, soil, environment and effluent temperatures, as well as weekly effluent collections (inlet and outlet). From monitoring, COD removal efficiency was 40.6% for summer and 36.8% for winter. For the solids values there were no considerable variations between the system input and output. There was a greater thermal variation in room temperature and biogas. In the summer / winter period it was observed that in summer the soil temperature was higher than the substrate temperature and that in winter the temperature behavior is the opposite. All monitored temperatures were found to correlate linearly, with r above 0.8. However, when temperatures are associated with COD removal efficiency, there is no linear correlation between them. However, there is a greater association with substrate temperatures (0.42), followed by biogas (0.36), soil (0.31) and ambient (0.16) temperatures. In summary, the monitored anaerobic system is operating with lower than expected organic matter removal efficiency.

However, it was observed that the substrate temperature in both periods, summer and winter, was lower than the optimum temperature for anaerobic microorganisms. And that the temperature of the substrate has a greater correlation with the soil temperature.

Keywords: Canadian biodigester. Anaerobic digestion. Pigs

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Mesorregiões do estado de Minas Gerais avaliadas no estudo.....	26
Figura 2.2. (A) Distribuição do número de granjas em função dos diferentes portes nas mesorregiões e (b) Minas Gerais	28
Figura 2.3. Distribuição espacial das granjas no estado de Minas Gerais por portes, assim como a vazão total de metano agrupada por mesorregião considerando-se granjas com biodigestores instalados.	29
Figura 2.4. (A) Potência elétrica diária por mesorregiões suinícolas (B) Potência elétrica diária do estado de Minas Gerais	30
Figura 2.5. (A) Energia disponível a partir do aproveitamento energético do biogás para diferentes portes nas mesorregiões e (B) Para o estado de Minas Gerais.....	32
Figura 2.6. Estimativa da geração de energia elétrica disponível em Minas Gerais advinda do aproveitamento energético do biogás em suinoculturas.....	32
Figura 3. 1. Detalhamento das dimensões externas e internas dos biodigestores	41
Figura 3. 2. Croqui do sistema de tratamento dos efluentes da suinocultura com a indicação da localização dos sensores de temperatura no biodigestor.....	42
Figura 3. 3. Comportamento típico para um ciclo diário das temperaturas internas e externas do biodigestor para o período de Jan a Dez.18.....	44
Figura 3. 4. Ciclo diário das temperaturas internas e externas ao biodigestor para o período de verão e inverno 2018.....	47
Figura 3. 5. Ciclo diário das temperaturas internas e externas ao biodigestor para o período de outono e primavera 2018.....	47
Figura 3. 6. Variações das temperaturas internas e externas ao biodigestor lagoa coberta no período monitorado (Dez./17 – Dez./18).....	51
Figura 3. 7. Comportamento das variações de DQO ao longo dos dias operacionais.	53
Figura 3. 8. Comportamento das variações de Sólidos Totais ao longo dos dias operacionais.....	53
Figura 3. 9. Gráfico box-plot para a DQO e eficiência de remoção em termos de DQO nos períodos quente e frio.	57
Figura 3. 10. Gráfico box-plot para ST e eficiência de remoção nos períodos quente e frio.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Distribuição do plantel de suínos para o estado de Minas Gerais referente a janeiro de 2019.	26
Tabela 2.2. População rural suprida com o aproveitamento energético do biogás de suinocultura com biodigestor	33
Tabela 3. 1. Média mensal das temperaturas monitoradas com seu respectivo desvio padrão.	50
Tabela 3. 2. Característica do efluente de suinocultura em relação aos valores de DQO e série de sólidos para o período de Dez/2017 a Dez/2018.....	55
Tabela 3. 3. Valores de correlação linear entre temperaturas no interior e exterior dos biodigestores e a eficiência de remoção de DQO.	59

LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia elétrica
BLC – Biodigestor modelo Lagoa Coberta
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
Cp – consumo per capita
COPAM – Conselho Estadual de Proteção Ambiental
DQO – Demanda química de oxigênio
E – Energia elétrica disponível
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMA – Instituto Mineiro de Agropecuária
Mt – volume de esterco por animal
Pbi – Produção de biogás
Pc – Poder Calorífico do metano
PE_{atual} - Potência elétrica atual
PE_{inst} - Potência elétrica instalada – outorgada
PE_{tot} – Potência elétrica total
pH – Potencial hidrogeniônico
Pi – Potencial energético do biogás
PV – Produção volumétrica de metano
PVC- Policloreto de vinila
Qi_{atual} - Vazão de Metano em propriedades com biodigestor
Qi_{tot} – Vazão de Metano em todas as propriedades
Qt – número de animais
SF – Sólidos Fixos
SIG – Sistema de Informação Geográfica
ST – Sólidos totais
SV – Sólidos Voláteis
T – Tempo de funcionamento do motogerador
VE – Volume específico do metano
 η_c - Eficiência de conversão do combustível
 η_g - Rendimento do alternador
 η_r - Valor ajustado pelo operador da potência elétrica de saída do motogerador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 REFERÊNCIAS.....	18
2 POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PROVENIENTE DAS SUINOCULTURAS NO ESTADO DE MINAS GERAIS	19
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	21
2.2.1 Aquisição dos dados das suinoculturas de Minas Gerais	21
2.2.2 Diagnóstico das granjas de Minas Gerais	21
2.2.3 Produção volumétrica de metano.....	22
2.2.4 Estimativa da produção volumétrica teórica de biogás	22
2.2.5 Potencial energético a partir do biogás nas suinoculturas	23
2.2.6 Energia elétrica gerada a partir do aproveitamento energético do biogás .	24
2.2.7 Mapas temáticos	25
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
2.3.1 Diagnóstico das granjas de Minas Gerais	26
2.3.2 Potencial energético das suinoculturas	29
2.3.3 Energia elétrica diária gerada a partir do aproveitamento energético do biogás.....	31
2.4 CONCLUSÕES	34
2.5 REFERÊNCIAS.....	35
3. ESTUDO ENTRE AS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA E VARIAÇÕES SAZONAIS DE TEMPERATURA NA OPERAÇÃO DE BIODIGESTORES ANAERÓBIOS MODELO LAGOA COBERTA	38
3.1 INTRODUÇÃO	39
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	40
3.2.1 Área de estudo	40

3.2.2 Monitoramento das temperaturas internas e externas dos biodigestores modelo lagoa coberta.....	42
3.2.3 Monitoramento da qualidade dos efluentes	43
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
3.3.1 Tendência das variações térmicas diária.....	44
3.3.2 Comportamento das temperaturas nos períodos verão/inverno e outono/primavera.....	46
3.3.3 Monitoramento das temperaturas internas e externas ao biodigestor modelo lagoa coberta	49
3.3.4 Monitoramento do sistema de tratamento.....	52
3.3.5 Estudo da correlação entre as temperaturas e a eficiência de remoção da DQO.....	59
3.4 CONCLUSÕES	60
3.5 REFERÊNCIAS.....	61
4. CONCLUSÃO GERAL.....	65
4.1 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISA	65

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, a utilização da energia elétrica produzida a partir do biogás proveniente da decomposição anaeróbia de biomassa ainda é limitada e apresenta baixa representativa na matriz energética brasileira. No entanto, o país dispõe de uma vasta geração de biomassa residual provinda das atividades agropecuárias, em especial originada no setor de suinocultura (FERNANDES et al., 2014), visto que a suinocultura é uma das principais atividades do agronegócio brasileiro. Embora esta atividade seja presente em todas as regiões do país, destaca-se o estado de Minas Gerais, sendo este, o quarto maior produtor de carne suína (ABCS, 2016).

Grande parte das suinoculturas criam seus animais em sistemas intensivos de confinamentos. Neste sistema, segundo Amaral et al. (2016) os animais são mantidos em espaços reduzidos, resultando em grande volume de dejetos por área ocupada. Conforme Matos e Matos (2017), essa biomassa gerada apresenta expressivo potencial poluidor.

Existem vários métodos para tratamento desses dejetos, sendo eles lagoas de decantação, esterqueiras, compostagem, cama sobreposta e biodigestores (CARDOSO et al. 2015). Os biodigestores são lagoas anaeróbias hermeticamente fechadas sem a presença de oxigênio, nas quais a estabilização da matéria orgânica ocorre por meio da digestão anaeróbia (COELHO et al., 2018). Neste processo, os compostos orgânicos são degradados pela ação de diferentes comunidades microbianas e convertidos em biogás e biofertilizante (CHERNICHARO, 2008).

De maneira simplificada, esta conversão da matéria orgânica ocorre em quatro etapas, denominadas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A primeira etapa, fermentação ou hidrólise, refere-se à transformação dos compostos orgânicos complexos (carboidratos, lipídios e proteínas) em compostos orgânicos simples, tais como açúcares, peptídeos, aminoácidos, entre outros, por meio de enzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Em seguida, na fase acidogênica, realiza-se a produção de ácidos orgânicos voláteis e álcoois pela ação das bactérias acidogênicas. Na terceira etapa, a acetogênese, os álcoois e ácidos produzidos na etapa anterior são oxidados em acetato, dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂) por bactérias acetogênicas. O acetato, CO₂ e H₂ pela ação das arqueias metanogênicas é transformado em metano (CH₄) e CO₂ (KINYUA et al. 2016; CHERNICHARO, 2007).

Essas etapas são indispensáveis para que o sistema seja bem-sucedido, uma vez que elas são interconectadas, de forma que, o produto de uma serve como substrato da próxima fase (KINYUA et al. 2016). Contudo, o funcionamento deste processo é dependente de alguns parâmetros operacionais, destacando a temperatura, visto que, esta influência no crescimento e desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica (DENG et al., 2016).

Assim, visto a importância econômica da produção de suínos para o estado de Minas Gerais e frente aos benefícios que o tratamento correto dos resíduos pode proporcionar, em termo de saneamento rural, redução da emissão do gás metano para atmosfera destinando-o para produção de energia elétrica, térmica ou combustível, além da ciclagem de nutrientes essenciais para as plantas, faz-se necessário o controle e monitoramento do processo anaeróbio.

No entanto, a tecnificação deste sistema ainda é um grande desafio, observa-se que existem uma lacuna de conhecimentos em termos das condições ambientais e operacionais que podem afetar estes sistemas de tratamento, visto que a maioria dos sistemas são monitorados somente em termos de eficiência do tratamento, não atentando para o monitoramento das temperaturas que podem interferir no processo anaeróbio. Este estudo se propôs explorar como as temperaturas no interior e exterior ao biodigestor em escala plena podem interferir no processo anaeróbio. Além de apresentar uma visão panorâmica do aproveitamento energético do biogás proveniente das suinoculturas de Minas Gerais.

Este trabalho está dividido em quatro capítulos. Neste capítulo inicial foram apresentados a contextualização enfatizando a motivação do assunto e os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo, foi estruturado na forma de artigo. No qual, aborda-se a estimativa e mapeamento da produção, assim como do potencial energético do biogás proveniente de suinoculturas de diferentes portes no estado de Minas Gerais.

No terceiro capítulo também estruturado na forma de artigo apresenta-se o monitoramento do sistema de tratamento de efluentes de uma suinocultura localizada em Teixeira, MG. Este monitoramento, teve como objetivo determinar a eficiência do sistema, assim como explorar como as temperaturas no interior e exterior ao biodigestor podem interferir no processo anaeróbio.

E por fim, no quarto capítulo apresenta-se a conclusão geral do estudo, seguido de alguns tópicos para trabalhos futuros, afim de complementar essa pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Estudar o potencial energético a partir do biogás produzido em biodigestores modelo lagoa coberta e compreensão das variáveis determinantes no processo de degradação.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Traçar um panorama do emprego de biodigestores modelo lagoa coberta no estado de Minas Gerais;
- ii. Estudar o potencial energético contido nos biodigestores modelo lagoa coberta;
- iii. Avaliar a influência da sazonalidade climática na eficiência do sistema anaeróbio;
- vi. Avaliar as tendências e o comportamento entre as temperaturas no interior e exterior de biodigestores modelo lagoa coberta.

1.3 REFERÊNCIAS

ABCS. **Mapeamento da Suinocultura brasileira**. 1ºed. Brasília, DF. 2016. Disponível em: http://www.abcs.org.br/attachments/-01_Mapeamento_COMPLETO_bloq.pdf . Acesso em: 10 de dezembro de 2018.

AMARAL, G. F., GUIMARÃES, D. D., NASCIMENTO, J. C. D. O. F., & CUSTODIO, S. Avicultura de postura: estrutura da cadeia produtiva, panorama do setor no Brasil e no mundo e o apoio do BNDES. **Agroindustria, BNDES setorial**, v. 43, p.167-207, 2016.

CARDOSO, B. F., OYAMADA, G. C., SILVA, C. M. Produção, tratamento e us dos dejetos suínos no Brasil. **Desenvolvimento em questão Editora Unijuí**. ano 13, n. 32, 2015.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, 2008, 380 p.

COELHO, S. T. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás; Part. II Biometano**. São Paulo: IEE-USP, 218p. 2018.

DENG, L., CHEN, C., ZHENG, D., YANG, H., LIU, Y. E CHEN, Z. Effect of temperature on continuous dry fermentation of swine manure. **Journal of environmental management**, v. 177, p. 247-252, 2016.

FERNANDES, D. M., COSTANZI, R. N., FEIDEN, A., DE SOUZA, S. N. M., & KITAMURA, D. S. .Processo de biodigestão anaeróbia em uma granja de suínos. **Ambiência** v. 10, n. 3, p.741-754, 2014.

MATOS, A. T. de, MATOS, M. P. de. **Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2017, 371 p.

2 POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PROVENIENTE DAS SUINOCULTURAS NO ESTADO DE MINAS GERAIS

RESUMO: O setor suinícola se destaca como alternativa para a produção descentralizada de energia elétrica a partir do aproveitamento energético do biogás. No entanto, este aproveitamento ainda é limitado. Neste estudo objetivou-se estimar e mapear a produção, assim como a potência elétrica originada pelo aproveitamento do biogás proveniente de suinoculturas de diferentes portes e das propriedades que possuem biodigestores lagoa coberta no estado de Minas Gerais. O levantamento foi realizado a partir dos dados disponibilizados pelo Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA). Estimaram-se três formas de potência elétrica denominadas como (i) total, (ii) atual e (iii) instalada outorgada. Estas potências foram estimadas a partir do volume de esterco gerado por fase de criação dos animais. A potência elétrica total correspondeu a 31 MW. Enquanto que a potência elétrica atual foi igual a 20 MW. No que tange a potência elétrica instalada outorgada, o valor ainda é reduzido, sendo 35,4% da potência elétrica atual. Observou-se que 55% da potência elétrica atual se concentra em apenas duas mesorregiões, Triângulo Mineiro/Alto do Paranaíba e Zona da Mata. A partir deste levantamento verificou-se que o aproveitamento do biogás contribui para proporcionar autossuficiência energética das granjas, além da geração descentralizada de energia.

Palavras-chave: biodigestor lagoa coberta, recuperação energética, dejetos suínos

2.1 INTRODUÇÃO

O expressivo esgotamento de combustíveis fósseis somados aos impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas têm incentivado alguns países, como o Brasil, a diversificar suas matrizes energéticas (Chinnici e Pecorino, 2015). Dentre as alternativas, a energia a partir da biomassa tem ganhado cada vez mais destaque.

A recuperação da energia a partir da biomassa pode ser oriunda de diversos resíduos orgânicos, os quais são classificados em resíduos florestais, agroindustriais, urbanos e agropecuários (Freitas et al., 2019). Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 8,6% da matriz energética brasileira é proveniente da energia da biomassa, em que apenas uma pequena parcela (0,08%) é advinda da recuperação energética do biogás (ANNEEL, 2017).

Apesar da recuperação energética do biogás ser ainda incipiente no Brasil, a principal fonte de aproveitamento energético ocorre nas estações de tratamento de esgoto doméstico (ETE) (Freitas et al., 2019). Muitos estudos apontam para a sustentabilidade energética das ETES a partir da recuperação do biogás como fonte de energia (Udaeta et al., 2019, Santos et al., 2018, Rosa et al., 2016, Lobato et al., 2012).

De acordo com Santos et al. (2018), a viabilidade energética das plantas de tratamento está associada à carga orgânica dos efluentes, em que a atividade de suinocultura apresenta grande potencial, decorrente das elevadas cargas orgânicas dos efluentes, superiores às encontradas no tratamento de esgoto sanitário.

A suinocultura apresenta relevância no agronegócio brasileiro, sendo responsável, pela produção de 3,75 milhões de toneladas de carne suína no ano de 2017, sendo o estado de Minas Gerais responsável por cerca de 11% desta produção (ABPA, 2018).

A atividade suinícola é responsável pela geração de grande quantidade de dejetos decorrente do confinamento desses animais. Uma das tecnologias mais difundidas e indicadas para o tratamento desses resíduos agropecuários corresponde ao emprego dos biodigestores modelo Lagoa Coberta (BLC), também denominado Canadense (Calzar et al., 2015). Esta configuração se destaca pelo menor custo de construção e operação, e possibilidade de aproveitamento dos seus subprodutos, a saber: biogás e biofertilizante (Cheng e Wei, 2018).

Ferreira et al. (2018) salientam que o baixo aproveitamento do potencial energético do biogás está associado à limitação de legislação, incentivos econômicos

e regulamentação específicas para este fim. Outros fatores como a falta de planejamento estratégico na produção de biogás a ser explorado e a adaptação de tecnologias para geração descentralizada no país podem ser destacadas.

Segundo Reis e Reis (2017), a espacialização do potencial energético de possíveis unidades geradoras de energia elétrica por meio da ferramenta do Sistema de Informação Geográfica (SIG) é de grande relevância para estudos de diversificação da matriz energética, por auxiliar na identificação das regiões com potencial para produção de energia, tomada de decisão e gestão pelas companhias do setor elétrico.

Alguns estudos realizaram a determinação do potencial energético total do biogás advindos no setor de suinocultura em Minas Gerais (Reis e Reis, 2017) e por mesorregiões mineiras (Ferrarez et al., 2015), não se considerando em nenhum deles o volume de dejetos gerados nas diferentes fases de criação dos animais e condições de geração de eletricidade a partir da operação de sistemas de moto-geração, o que confere a este estudo um maior detalhamento na estimativa do potencial energético e uma análise energética da recuperação do biogás mais criteriosa. Desta forma, o objetivo desta pesquisa foi estimar e mapear a produção de biogás, assim como determinar a potência elétrica advinda do aproveitamento do biogás produzido em biodigestores modelo lagoa coberta gerado em suinoculturas de diferentes portes no estado de Minas Gerais.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Aquisição dos dados das suinoculturas de Minas Gerais

Os dados utilizados para a estimativa do potencial energético das suinoculturas no estado de Minas Gerais foram obtidos junto ao Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA). As informações utilizadas neste estudo são relativas à localização das granjas por coordenadas geográficas e número de animais por fase de criação. Os dados fornecidos pelo IMA sobre a atividade suinícola em Minas Gerais foram compilados para o mês de janeiro de 2019.

2.2.2 Diagnóstico das granjas de Minas Gerais

A partir dos dados fornecidos pelo IMA foi possível quantificar o plantel de Minas Gerais por fase de criação dos animais, ao se considerar os animais como leitões, varrão, matriz e engorda.

As suinoculturas foram classificadas em função do porte poluidor seguindo o critério da definição dos portes indicado na COPAM nº 217/2017, sendo organizadas em pequeno porte ($200 \leq \text{animais} < 2.000$), médio porte ($2.000 \leq \text{animais} \leq 10.000$) e grande porte (>10.000) (COMPAM, 2017). Estas propriedades foram avaliadas quando à presença de biodigestor modelo lagoas coberta por meio do uso da ferramenta Google Earth Pro. As unidades com número inferior a 200 animais não foram consideradas no estudo pelo reduzido potencial energético das granjas.

2.2.3 Produção volumétrica de metano

A produção volumétrica diária de metano foi obtida pela Equação 1 (CETESB, 2006) a partir do volume de esterco gerados por fase de criação dos animais (Oliveira, 1993). A produção volumétrica de metano foi determinada para duas condições: (i) vazão total de metano ($Q_{i\text{tot}}$) associada ao número de animais de todas as suinoculturas classificadas em pequeno, médio e grande porte, e (ii) vazão atual de metano ($Q_{i\text{atual}}$), sendo calculada somente a partir dos suínos nas propriedades que possuem instalados biodigestores modelo lagoa coberta.

De acordo com Leitão e Silva (2018), a porcentagem de CH_4 no biogás de suinoculturas varia entre 55 a 75 %. Contudo Machado et al. (2015), relatam que a variação diária da porcentagem de CH_4 no biogás encontradas em seu estudo foi de 75 a 77%, para o presente estudo, o biogás foi considerado com 75% de metano.

$$Q_i = \frac{(P_{bi} \times \%CH_4 \times Q_t \times M_t)}{VE} \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

Q_i = vazão de metano (total ($Q_{i\text{tot}}$) ou atual ($Q_{i\text{atual}}$)) ($\text{m}^3_{\text{CH}_4} \text{d}^{-1}$);

P_{bi} = produção de biogás, $0,062 \text{ kg}_{\text{biogás}} \text{ kg}^{-1}_{\text{esterco}}$ (Motta, 1986);

$\%CH_4$ = concentração de metano no biogás, admitiu-se igual a 75%;

Q_t = número de animais por categoria;

M_t = volume de esterco por animal ($\text{kg esterco d}^{-1} \text{ animal}^{-1}$), adotou-se para leitões (0,35 kg), varrões (3,0 kg), matrizes (3,6 kg) e engorda (2,3 kg) (Oliveira, 1993);

VE = volume específico do metano, sendo considerado igual à $0,670 \text{ kg}_{\text{CH}_4} \text{ m}^{-3}_{\text{CH}_4}$ (Motta, 1986).

2.2.4 Estimativa da produção volumétrica teórica de biogás

A estimativa da produção volumétrica teórica de biogás por fase de criação dos animais foi obtida a partir da equação 2.

$$PV_{\text{bio}} = \frac{Q_i}{Q_t} \times \frac{\%CH_4}{100} \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

PV_{bio} = produção volumétrica de biogás por categoria de animal ($m^3_{\text{biogás}} \text{ animal}^{-1}$);

Q_i = vazão de metano ($m^3_{CH_4} d^{-1}$);

$\%CH_4$ = concentração de metano no biogás, admitiu-se igual a 75%;

Q_t = número de animais por categoria.

2.2.5 Potencial energético a partir do biogás nas suinoculturas

Este estudo ainda propôs a determinação de diferentes conceitos associados ao potencial do biogás para a atividade suinícola, sendo estes indicados na forma de potência elétrica (PE) definida pelos seguintes critérios:

(i) Potência elétrica total

A potência elétrica total (PE_{tot}) correspondeu ao potencial energético total do biogás produzido nas suinoculturas classificadas em pequeno, médio e grande porte. Para tanto, foi considerado o número total de animais nas propriedades que possuíam ou não o tratamento de seus efluentes por biodigestores modelo lagoa coberta.

(ii) Potência elétrica diária atual

A potência elétrica atual (PE_{atual}) foi calculada considerando apenas o biogás proveniente das granjas que já possuem biodigestores modelo lagoa coberta instalados em suas propriedades para os três tipos de portes avaliados.

O cálculo da potência elétrica total (PE_{tot}) e atual (PE_{atual}) foi feito a partir da Equação 3 adaptada (CETESB, 2006), para tanto a fração da potência de saída dos motogeradores em relação à capacidade do sistema (η_r), a eficiência de conversão do combustível (η_c) e a eficiência do alternador (η_g) foram considerados, como definidos na sequência.

$$PE = Q_i \times P_c \times \eta_c \times \eta_g \times \eta_r \quad \text{Equação (3)}$$

em que:

PE = potência elétrica (total - PE_{tot} ou atual - PE_{atual}) (kW);

Qi = vazão de metano (total - Qi_{tot} ou atual - Qi_{atual}) por dia (m³CH₄ d⁻¹);

Pc = poder calorífico do metano, adotou-se 35.900 kJ.m⁻³ (ROSA et al., 2016).

η_c = eficiência de conversão do combustível (33,0%) (CETESB, 2006);

η_g = rendimento do alternador (91,5%) (WAG, 2019);

η_r = valor ajustado pelo operador da potência elétrica de saída do motogerador (80%).

(iii) Potência elétrica instalada outorgada

A potência elétrica instalada (PE_{inst}) correspondeu a máxima potência elétrica diária instalada outorgada por propriedade suinícola. Estes dados foram obtidos junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019). Foi realizado o somatório da potência elétrica diária instalada outorgada por mesorregião considerando apenas as propriedades que possuíam a modalidade geração na própria unidade consumidora.

2.2.6 Energia elétrica gerada a partir do aproveitamento energético do biogás

De posse dos dados da potência elétrica atual (PE_{atual}), considerou-se um tempo diário de operação do grupo motogerador de 22 horas (8.000 horas.ano⁻¹), o que permite fornecer um intervalo de tempo para manutenção do grupo motogerador, assim como de eventuais paralizações do sistema. A Equação 4 apresenta o cálculo da energia elétrica disponível para consumo (E) a partir do aproveitamento energético do biogás para todas as granjas de pequeno, médio e grande porte que apresentam biodigestores.

$$E = PE_{atual} \times t$$

Equação (4)

em que:

E = energia elétrica disponível por dia (kWh);

PE_{atual} = potência elétrica atual (kW);

t = tempo de funcionamento do motogerador (22h.d⁻¹).

Na sequência, determinou-se a população rural que poderia ter sua demanda energética suprida nas macrorregiões correspondentes caso fosse gerada energia elétrica a partir dos empreendimentos suinícolas que tratam seus efluentes por biodigestores modelo lagoa coberta (Equações 5 e 6).

$$\text{população}_{\text{suprida}} = \frac{E}{C_p} \quad \text{Equação (5)}$$

em que:

população_{suprida} = população suprida pela energia elétrica gerada (habitantes);

E = energia elétrica disponível por dia (kWh d⁻¹);

C_p = consumo *per capita*, sendo adotado igual a 6,9 kWh hab⁻¹ d⁻¹ (EPE, 2017).

$$\% \text{população}_{\text{rural}} = \frac{\text{população}_{\text{suprida}}}{\text{população}_{\text{IBGE}}} \quad \text{Equação (6)}$$

em que:

%população_{rural} = população rural suprida pela energia elétrica gerada (%);

população_{suprida} = população suprida pela energia elétrica gerada (habitantes);

população_{IBGE} = população rural disponibilizada pelo último levantamento realizado pelo IBGE (IBGE, 2010) (habitantes).

2.2.7 Mapas temáticos

Com o uso do software ArcGIS® 10.5, as planilhas eletrônicas do Microsoft Excel contendo os dados das localizações geográficas das granjas e seus respectivos potenciais foram importadas e convertidas para o formato shapefile (*.shp). Deste modo, os dados referentes ao diagnóstico das granjas, potência elétrica e energia elétrica advinda da recuperação energética deste subproduto foram avaliados para as mesorregiões do estado de Minas Gerais, como apresentado na Figura 2.1.

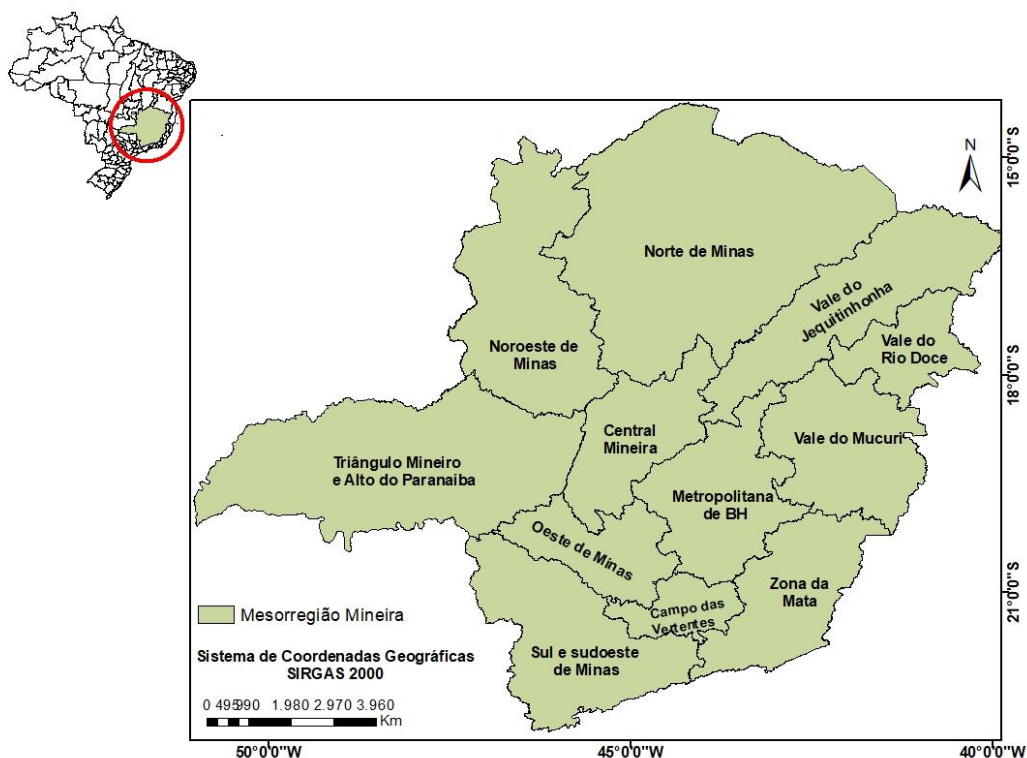


Figura 2. 1. Mesorregiões do estado de Minas Gerais avaliadas no estudo

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Diagnóstico das granjas de Minas Gerais

De acordo com o levantamento realizado pelo IMA para janeiro de 2019, o estado de Minas Gerais possui 4.739 propriedades com criação de suínos, totalizando um plantel de cerca de 3,4 milhões de cabeças. Neste plantel, observa-se que o número de leitões é predominante, seguido dos animais na fase de engorda (Tabela 2.1).

As mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Zona da Mata destacam-se como os principais polos de produção de carne suína em Minas Gerais. Observa-se que 39% do plantel se localiza no Triangulo Mineiro/Alto Paranaíba, seguido de 25% na Zona da Mata (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Distribuição do plantel de suínos para o estado de Minas Gerais referente a janeiro de 2019.

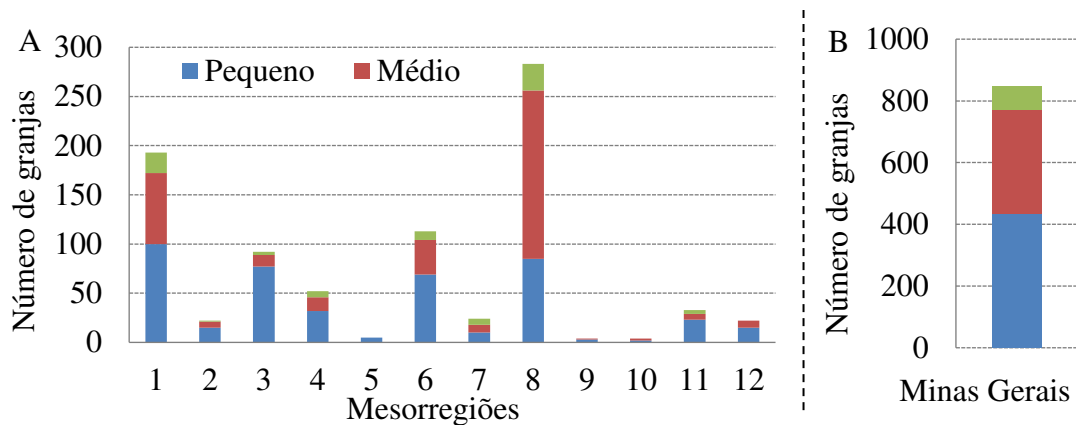
Mesorregião	Leitão	Varrão	Matriz	Engorda	Total
Vale do Rio Doce	1.163	116	714	2.227	4.220
Vale do Mucuri	3.228	61	336	1.569	5.194
Jequitinhonha	3.180	79	987	5.515	9.761
Norte de Minas	11.521	257	3.242	29.319	44.339

Campo das Vertentes	29.360	374	5.510	16.245	51.489
Sul/Sudoeste de Minas	47.616	537	18.470	98.930	165.553
Central Mineira	55.689	254	12.807	100.872	169.622
Noroeste de Minas	75.811	2.234	14.171	78.250	170.466
Oeste de Minas	114.663	488	24.441	103.872	243.464
Metropolitana de BH	146.847	1.309	37.864	206.849	392.869
Zona da Mata	437.310	917	87.881	339.998	866.106
Triângulo/Alto Paranaíba	998.243	4.148	94.736	247.386	1.344.513
Total	1.924.631	10.774	301.159	1.231.032	3.467.596

Das propriedades suinícolas, 82,1% se enquadram em criações de suínos de até 200 animais, embora representem apenas 1,8% do número total de animais. Dentre as classificadas em pequeno, médio e grande porte (Figura 2.2) observa-se uma predominância no número de granjas de pequeno porte, correspondendo a 9,2% das propriedades (436) e que apenas 1,6% foram classificadas como grande porte (77). No entanto, as granjas de grande porte são responsáveis por 45,3% do plantel mineiro.

O Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e a Zona da Mata são as mesorregiões com maior número de suinoculturas, compreendendo a 56,2% das granjas do estado (Figura 2.2). Esta maior concentração de suinocultura na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba se dá em virtude da maior disponibilidade de insumos e mercados consumidores que favorecem esta atividade (ABCS, 2017).

Dentre as propriedades classificadas como pequeno, médio e grande porte foi possível verificar que 79,2% das granjas de grande porte (61), 46,7% das de médio porte (156) e 17,9% das de pequeno porte (78) tratam seus resíduos por biodigestores modelo lagoa coberta.



Zona da Mata (1), Campo das vertentes (2), Sul /Sudoeste de Minas (3), Oeste de Minas (4), Vale Rio Doce (5), Metropolitana de BH (6), Central Mineira (7), Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (8), Vale do Mucuri (9), Jequitinhonha (10), Norte de Minas (11), Noroeste de Minas (12).

Figura 2. 2. (A) Distribuição do número de granjas em função dos diferentes portes nas mesorregiões e (b) Minas Gerais

Ao se considerar o confinamento dos animais nas granjas de pequeno, médio e grande porte estima-se, a partir da produção de esterco por categoria de animal, uma geração diária de 4.504,8 t de dejetos, dos quais, 65,4% são tratados via biodigestores anaeróbios modelo lagoa coberta em 295 propriedades, predominantes nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (126 propriedades com biodigestores instalados), seguido da Zona da Mata (58) e região metropolitana de BH (38) (Figura 2.3). Além disto, a Figura 2.3 indica ainda as faixas com a estimativa da produção da vazão de metano atual (a partir das propriedades que possuem biodigestores instalados), assim como a classificação das granjas em função de seu porte, tendo como premissas as faixas indicadas na COPAM n°217/2017.

Estima-se que nas propriedades que possuem biodigestores instalados a produção volumétrica de metano seja da ordem de 203.976,3 m³ de metano d⁻¹ (Figura 3.3), com produção estimada de 271.968,4 m³ de biogás d⁻¹. Observa-se que nas mesorregiões Norte de Minas, Vale do Mucuri e Vale do Jequitinhonha não há presença de biodigestores nas propriedades suínícolas (Figura 2.3). Esta ausência está associada ao reduzido número de granjas de criação intensiva, uma vez que, nestas regiões há uma predominância de grandes propriedades comumente ocupadas por pastagens, monocultura de eucalipto ou banana (DAYRELL et al., 2017).

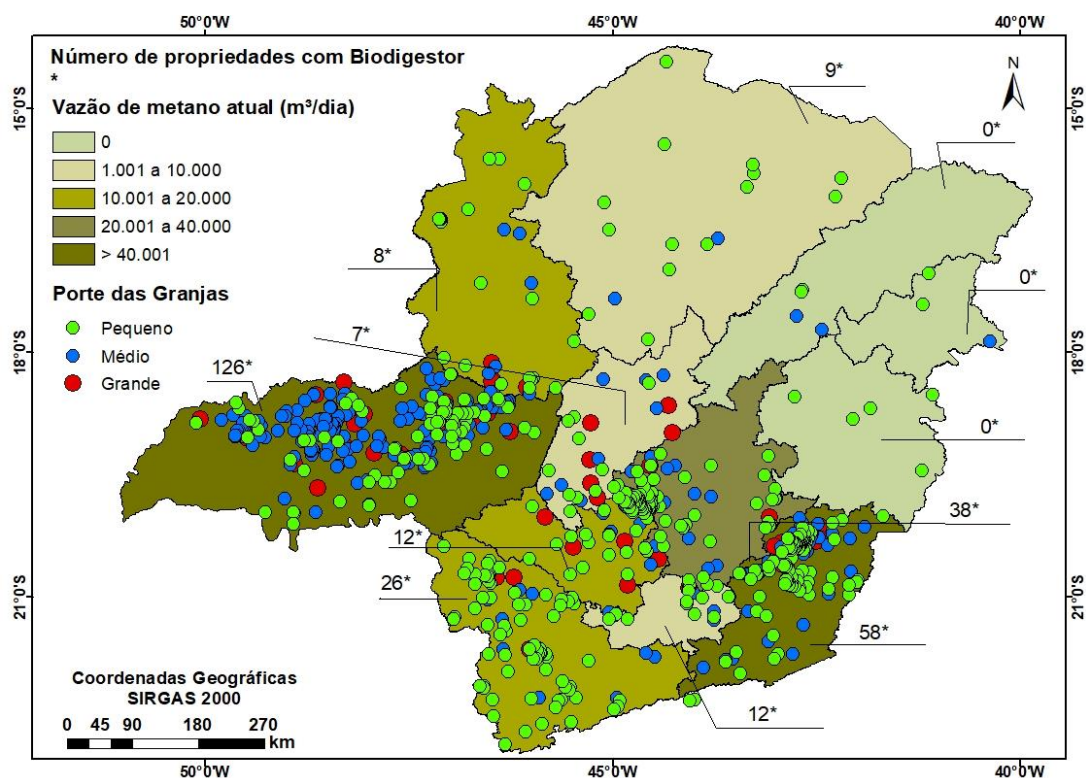


Figura 2. 3. Distribuição espacial das granjas no estado de Minas Gerais por portes, assim como a vazão total de metano agrupada por mesorregião considerando-se granjas com biodigestores instalados.

Em termos de produção volumétrica de biogás por categoria de animal - $PV_{(bio)}$, estima-se que os valores obtidos corresponderam em m^3 de biogás. $animal^{-1}.d^{-1}$, 0,33 para matriz, 0,03 para leitões, 0,28 para varrão e 0,21 para engorda (crescimento e terminação).

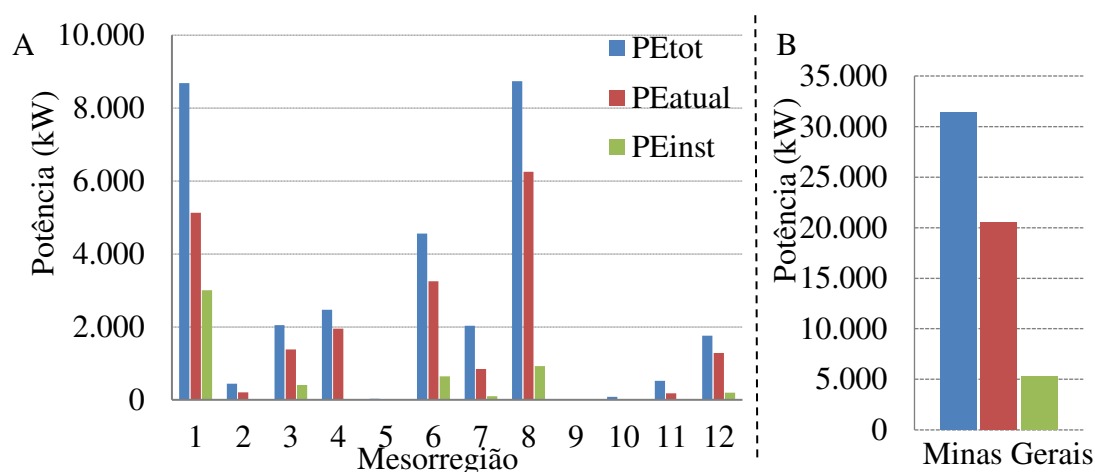
O valor estimado de produção de biogás para leitões foi inferior ao relatado por Coelho et al., (2018) em que considera uma geração de $0,10 m^3$ de biogás. $animal^{-1}.d^{-1}$ para suínos em fase de creche. Já os valores estimados para suínos em engorda estão dentro da faixa encontrada por Silva et al. (2018) e Oliveira (1993) em que obtiveram uma relação de produção de biogás variando na faixa de $0,10 m^3$ a $0,24 m^3$ de biogás. $animal^{-1}.d^{-1}$.

2.3.2 Potencial energético das suinoculturas

A potência elétrica total (PE_{tot}) advinda das suinoculturas neste estudo foi de 31.392,1 kW. Enquanto que a potência elétrica atual (PE_{atual}) correspondeu a 20.479,9 kW. No que tange a potência elétrica instalada outorgada (PE_{inst}), em Minas Gerais o valor ainda é reduzido, sendo de apenas 5.278 kW (ANEEL, 2019), 35,4% da potência elétrica atual (Figura 2.4-B).

Observa-se na Figura 2.4-A, que grande parte das mesorregiões possuem uma potência elétrica atual de até 1.000 kW. No entanto, apenas duas mesorregiões, Triângulo Mineiro/Alto do Paranaíba e a Zona da Mata representam 55% da potência elétrica diária atual em Minas Gerais.

A Zona da Mata se destaca por possuir 11 municípios com outorgas, totalizando uma potência elétrica instalada outorgada de 3.004,84 KW, seguido do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba com 7 municípios, totalizando uma potência elétrica diária instalada outorgada de 922,8 kW (ANEEL, 2019) (Figura 2.4-A).



Zona da Mata (1), Campo das vertentes (2), Sul/Sudoeste de Minas (3), Oeste de Minas (4), Vale Rio Doce (5), Metropolitana de BH (6), Central Mineira (7), Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (8), Vale do Mucuri (9), Jequitinhonha (10), Norte de Minas (11), Noroeste de Minas (12).

Figura 2. 4.(A) Potência elétrica por mesorregiões suínícolas (B) Potência elétrica do estado de Minas Gerais

O reduzido aproveitamento energético pode ser associado à desmotivação para implementação de projetos devido às barreiras tecnológicas, disponibilidade de informações técnicas e de profissionais capacitados, a fim de, garantir o controle do processo (FERREIRA et al., 2017).

A implementação do sistema de geração de biogás e do seu aproveitamento demanda altos investimento iniciais e o reduzido número de projetos bem-sucedidos, faz com que o risco de investimento seja uma barreira a ser enfrentada (MARIANI, 2018).

Ainda segundo Mariani (2018), outras barreiras encontradas neste setor estão relacionadas as tecnológicas para o aproveitamento energético do biogás, que muitas vezes são importadas ocasionando elevados custos para sua aquisição, assim como elevados períodos para a manutenção dos equipamentos de conversão à eletricidade, resultando a baixos rendimentos para o suinocultor. Este autor também ressalta que, a

falta de organização e difusão das informações já existentes, além da capacitação de pessoas que sejam capazes de intervir no processo, de modo que, operem satisfatoriamente também são outros desafios a serem enfrentados.

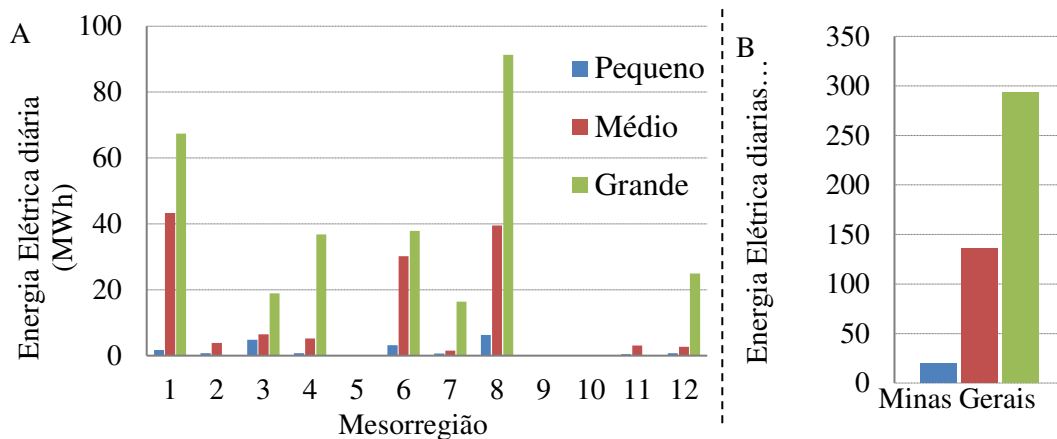
Dessa forma, para que o aproveitamento energético seja mais promissor torna-se necessário (i) aumentar a eficiência dos sistemas de biodigestão que, via de regra, não são instrumentalizados; (ii) aperfeiçoar os motogeradores para que possam operar pela queima do biogás, uma vez que normalmente são equipamentos adaptados de sua operação por diesel, e quando convertidos à biogás apresentam baixa eficiência quando comparados aos motogeradores importados similares; (iii) aprimorar a operação de filtros para remoção do gás H_2S , afim de aumentar sua eficiência, uma vez que, este gás possui odor desagradável e é corrosivo, além de reduzir a vida útil dos equipamentos.

Reis e Reis (2017) ao realizar um levantamento do potencial energético de vários setores, considerou, para a atividade de suinocultura, dados de entrada referente ao número total de animais obtido junto ao IBGE para o ano de 2015, não sendo consideradas as especificidades relativas ao número de animais por fase de criação em cada granja e a geração de resíduos por tipo de animais nas suas diferentes fases de desenvolvimento. Acredita-se que a proposta metodológica e os dados de entrada do presente trabalho são mais coerentes com as condições reais, reportando, assim, dados do potencial energético do biogás na atividade suinícola, para o estado de MG, mais próximos da realidade.

2.3.3 Energia elétrica diária gerada a partir do aproveitamento energético do biogás

A partir dos dados da potência elétrica atual e do tempo médio de funcionamento do sistema de motogeração de energia de 22 horas.d⁻¹ determinou-se a energia elétrica diária gerada a partir do aproveitamento energético do biogás.

A partir dos dados da potência elétrica atual observou-se predomínio de granjas classificadas como médio porte, totalizando 156 propriedades. No entanto, 61 propriedades classificadas como grande porte representam 65% da energia elétrica diária que pode ser gerada nas granjas com biodigestor (Figura 2.5). Evidenciando que o porte da granja apresenta maior influência no aproveitamento energético que o número de granjas.



Zona da Mata (1), Campo das vertentes (2), Sul/Sudoeste de Minas (3), Oeste de Minas (4), Vale Rio Doce (5), Metropolitana de BH (6), Central Mineira (7), Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (8), Vale do Mucuri (9), Jequitinhonha (10), Norte de Minas (11), Noroeste de Minas (12).

Figura 2. 5. (A) Energia elétrica diária disponível a partir do aproveitamento energético do biogás para diferentes portes nas mesorregiões e (B) Para o estado de Minas Gerais.

Observa-se na Figura 2.6 que as mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, seguida da Zona da Mata, Metropolitana de Belo Horizonte, Oeste de Minas e Sul/Sudoeste de Minas possuem o maior número de municípios propícios a contribuir com o aumento da matriz energética de Minas Gerais, totalizando uma geração de eletricidade da ordem de 394 MWh por dia.

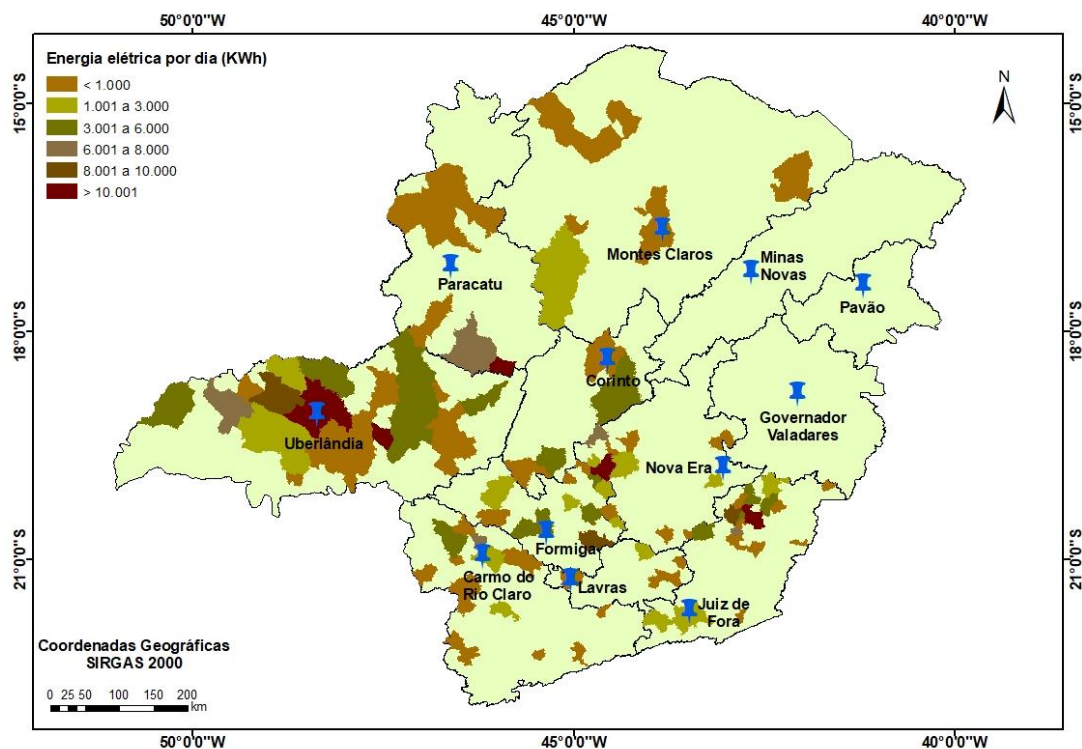


Figura 2. 6. Estimativa da geração de energia elétrica diária disponível em Minas Gerais advinda do aproveitamento energético do biogás em suinoculturas.

A energia elétrica diária disponível nas propriedades que atualmente possuem biodigestor seria capaz de suprir a demanda energética de 65 mil habitantes no estado de Minas Gerais. O Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Zona da Mata seriam as mesorregiões mineiras com maior potencial, suprindo uma população de 19.873 e 16.296 habitantes, respectivamente (Tabela 2.2).

A partir dos dados da população rural de Minas Gerais disponibilizados pelo último levantamento do IBGE realizado em 2010, observa-se que dentre as mesorregiões, o Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba apresentou um potencial capaz de suprir 10,8% de sua população rural, seguida do Oeste de Minas Gerais (5,5%).

Tabela 2.2. População rural suprida com o aproveitamento energético do biogás de suinocultura com biodigestor

Mesorregião	População Rural IBGE (hab.)	População (hab.)	População rural suprida (%)
Zona da Mata	417.323	16.296	3.9
Campo das Vertentes	85.608	658	0.8
Sul/Sudoeste de Minas	458.389	4.380	1.0
Oeste de Minas	112.408	6.193	5.5
Vale do Rio Doce	319.661	n.e	n.e
Metropolitana de BH	291.247	10.320	3.5
Central Mineira	52.365	2.699	5.2
Triângulo/Alto do Paranaíba	184.454	19.873	10.8
Vale do Mucuri	124.489	n.e	n.e
Jequitinhonha	264.251	n.e	n.e
Norte de Minas	492.119	562	0.1
Noroeste de Minas	79.800	4.074	5.1
Total	2.882.114	65.054	2.3

n.e – não produz energia elétrica

2.4 CONCLUSÕES

No plantel de suínos em Minas Gerais contabilizado em janeiro de 2019 pelo IMA houve a predominância de suínos na fase de leitão, seguido de animais na fase de crescimento para engorda.

Dentre os portes avaliados, observa-se que em Minas Gerais, em número de propriedades, houve a predominância de suinoculturas com número de animais inferior a 200, seguido de empreendimentos de pequeno porte. No entanto, as classificadas como grande porte são responsáveis por quase metade da criação do número de suínos no estado.

As mesorregiões Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Zona da Mata são os maiores polos suinícolas de Minas Gerais, sendo responsável por concentrar o maior número de granja e de animais. Também nestas mesorregiões estão localizadas a maioria das propriedades que possuem biodigestor e apresentam potência elétrica outorgada instalada.

A maioria dos suinocultores de Minas Gerais ainda não utiliza o processo de biodigestão anaeróbia como alternativa para tratamento dos dejetos.

A partir da espacialização das unidades geradoras de biogás por meio da ferramenta do Sistema de Informação Geográfica (SIG) foi possível identificar as mesorregiões que possuem potencial para produção de energia elétrica.

A geração de energia elétrica por meio da recuperação do biogás ficou evidenciada, e pode indicar o aprimoramento da autossuficiência energética das granjas e da geração descentralizada de energia. Vale ressaltar, que o emprego de biodigestores e o aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica contribui para minimizar os lançamentos de cargas poluidoras no ambiente e reduz a emissão de gases de efeito estufa.

Para que a atividade de suinocultura se torne mais sustentável em termos energéticos e mais atrativa para os suinocultores que ainda não fazem o aproveitamento energético do biogás, faz-se necessário melhorias em termos de operação e monitoramento dos biodigestores, assim como o desenvolvimento de motogeradores mais eficientes e que operem à biogás, desenvolvimento de filtros para remoção de H₂S e capacitação de profissionais que atuem neste setor.

2.5 REFERÊNCIAS

ABCS. Associação Brasileira dos Criadores de Suínos. Mapeamento Suinocultura brasileira e suas dimensões (2017). Revista da suinocultura. 5(22).

ABPA. Associação Brasileira de Proteína animal (2018) Relatório anual 2018 - Disponível em: <http://abpa-br.com.br/storage/files/relatorio-anual-2018.pdf>. Acesso em: 20 de março de 2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Boletim de informações Gerais. 1º trimestre de 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+1%C2%BA+trimestre+de+2017/798691d2-990b-3b36-1833-c3e8c9861c21>. Acesso em: 29 de abril 2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração distribuída. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjltN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 29 de abril de 2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Dispõe das condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em: 29 de abril de 2019.

CALZA LF, DE LIMA C B, NOGUEIRA CEC, SIQUEIRA JAC, SANTOS RF (2015). Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. Engenharia Agrícola 35(6).

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. (2006) Manual do usuário do programa de computador Biogás geração e uso energético- efluente e resíduos rural – versão 1.0. CETESB, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, Ministério de Ciências e tecnologia. São Paulo, 62p.

CHENG DL, WEI D (2018). Problematic effects of antibiotics on anaerobic treatment of swine wastewater Bioresource Technology 263:642-653.

CHINNICI G, PECORINO B (2015) Analysis of biomass availability for energy use in Sicily. Renewable and Sustainable, Energy Reviews, 52:1025-1030.

COELHO ST (2018) Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás; Part. II Biometano. São Paulo: IEE-USP, 218p.

COMPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental. Resolução Normativa Copam nº 217, de 06 de dezembro de 2017. Dispõe dos critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=45558>. Acesso em: 22 de março 2019.

DAYRELL CA, BARBOSA RS, COSTA JB A (2017) Dinâmicas produtivas e territoriais no Norte de Minas: o lugar invisível das economias nativas e apontamentos

para políticas públicas. CAMPO-TERRITÓRIO: revista de geografia agrária 12(27):128-151.

EPE- Empresa de Pesquisa energética (2017). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 ano base 2016. Brasília, 232p.

FREITAS FF, SOUZA SS, FERREIRA LRA, OTTO RB, ALESSIO FJ, SOUZA SNM, VENTURINI OJ, ANDORJUNIOR OH (2019) The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews 101:146-157.

FERRAREZ AH, OLIVEIRA FILHO D, GRACIA LM N, MARTINEZ J M, LOPES RP, SILVA JÚNIOR AG, DE SOUZA NS (2015) Geração de eletricidade com codigestão de resíduos agropecuários na região da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil. R. gest. sust. ambient. esp:302-316.

FERREIRA LRA, OTTO RB, SILVA FP, DE SOUZA SNM, DE SOUZA SS, ANDO JUNIOR OH (2018) Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews 94:440–455.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) Tabela 4.17.1.1 - População residente, por situação do domicílio e sexo, segundo as mesorregiões, as microrregiões, os municípios, os distritos, os subdistritos e os bairros - Minas Gerais – 2010 Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=resultados>. Acesso: 29 de março 2019.

LEITÃO FO, SILVA WH (2018) Geração de Energia e Renda a Partir do Tratamento dos Resíduos da Suinocultura. IGepec, Toledo 22(1):116-132.

LOBATO LCS, CHERNICHARO CAL, PUJATTI FJP, MARTINS OM, MELO GCB, RECIO AAR (2012) Use of biogas for cogeneration of heat and electricity for local application: performance evaluation of an engine power generator and a sludge thermal dryer. Water Science and Technology, 67 (1):159-167.

MACHADO NS, DA SILVA JN, DE OLIVEIRA MVM, COSTA J M, BORGES AC (2015) Remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás da fermentação anaeróbia de dejetos de suínos utilizando óxido de ferro, hidróxido de cálcio e carvão vegetal. Energia na agricultura, 30(4):344-356.

MARIANI L (2018) Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. Tese, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

MOTTA FS, (1986) Produza sua energia – biodigestores anaeróbicos. Recife gráfica, Editora AS,

OLIVEIRA PAV (1993) Manual de Manejo e utilização de dejetos suínos. Concórdia, SC.

REIS RJDOS, REIS LSDOS, (2017) Potencial de Energia da Biomassa em Minas Gerais. Belo Horizonte, ed: Rona Gráfica e Editora. 380p.

ROSA AP, LOBATO LCS, BORGES JM, MELO GCB, CHERNICHARO CAL (2016) Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). Eng Sanit Ambient 21(2):315-328.

SANTOS IFS, GONÇALVES ATT, BORGES PB, BRARROS RM, LIMA RS (2018) Combined use of biogas from sanitary landfill and wastewater treatment plants for distributed energy generation in Brazil. *Resources, Conservation & Recycling* 136:376–388.

SILVA F P, DE SOUZA SNM, KITAMURA DS, NOGUEIRA CEC, OTTO RB (2018) Energy efficiency of a micro-generation unit of electricity from biogas of swine manure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82:3900-3906.

UDAETA MEM, MEDEIROS GAS, SILVA VO, GALVÃO LCR (2019) Basic and procedural requirements for energy potential from biogas of sewage treatment plants. *Journal of Environmental Management* 236:380–387.

WEG - Werner, Eggon e Geraldo. Folha de dados Alternador. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Geradores/Alternadores-para-Grupos-Generadores/Industrial/GTA202AI36-IP21-B15T-SAE-2-SAE-11%2C5/p/14408165> Acesso em: 15 de abril de 2019.

3. ESTUDO ENTRE AS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA E VARIAÇÕES SAZONAIS DE TEMPERATURA NA OPERAÇÃO DE BIODIGESTORES ANAERÓBIOS MODELO LAGOA COBERTA

Resumo: A eficiência de operação dos biodigestores é influenciada pela atividade metabólica de microrganismos que apresentam grande sensibilidade a alterações das condições de equilíbrio no meio. Dessa forma, o monitoramento e controle dos fatores que interferem no processo anaeróbio em escala plena se torna crucial para detectar instabilidade no sistema. Assim, o objetivo do estudo foi avaliar a variação de temperatura ambiente e interna do biodigestor na eficiência de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos totais (ST). O experimento foi realizado em uma suinocultura localizada no município de Teixeira - MG. A área de estudo possui dois biodigestores anaeróbios modelo lagoa coberta, em paralelo. O monitoramento da temperatura interna do biodigestor foi realizado através de sensores de forma contínua por meio da transferência dos dados em tempo real, por telemetria, a qual os dados são enviados para uma central de monitoramento localizada na Rede BioForte (Vila Gianetti, Campus UFV). Semanalmente, foi realizado coletas do efluente na entrada e saída dos biodigestores anaeróbios para o monitoramento em termo de DQO, série de sólidos e pH. A partir do monitoramento das temperaturas verificou-se que as temperaturas ambiente e do biogás são as que mais oscilam ao longo do ciclo diário e que a temperatura do solo e do substrato permanecem quase constante. Os valores de DQO no afluente variaram de 34,3 a 12,3 g.L⁻¹, com valor médio de 22,0 g.L⁻¹. Para o efluente de saída, as médias alcançaram valores máximos, mínimos e médios de 14,3, 9,6 e 11,2 g.L⁻¹, respectivamente. A eficiência média de remoção de DQO foi igual a 40,6% no período do verão e 36,8% no período do inverno. E por fim, a temperatura do substrato apresentou maior correlação com a temperatura média mensal do solo ($r=0,96$), seguida da temperatura do biogás ($r=0,94$) e da temperatura ambiente ($r=0,85$). No entanto, não houve correlação entre as temperaturas monitoradas e a eficiência de remoção de DQO.

Palavras chave: suinocultura, variáveis ambientais, sistemas anaeróbios

3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores pecuários do mundo, e dentre o setor pecuário, a suinocultura se destaca, ocupando o 4º lugar no ranking de produção e exportação de carne suína (IBGE, 2016). No entanto, o confinamento desses animais implica na geração de grande quantidade de dejetos, que quando manejados inadequadamente geram poluição aos corpos hídricos e contaminação do lençol freático, além de emissão de odores, compostos voláteis e gases nocivos que contribuem para o efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O) (McAULIFFE et al., 2017).

Uma das configurações de biodigestores mais indicados para o tratamento desses resíduos é por meio de Biodigestores de Lagoa Coberta (BLC), operando com o regime hidráulico pistonado, dada a grande relação comprimento/largura. Estas unidades de escoamento horizontal contínuo são conhecidas por “modelo canadense”. O modelo BLC foi amplamente difundido no Brasil devido ao interesse das suinoculturas na obtenção de crédito de carbono dentro do contexto do já extinto Protocolo de Kyoto (KONSEN, 2005).

Apesar da instalação de um grande número de unidades, o emprego dos BLC ainda encontra limitações operacionais, muitas vezes pela falta de suporte técnico ou por falta de conhecimento para intervenção no processo, em especial no sentido de potencializar as eficiências de remoção de matéria orgânica e produção do biogás (FERNANDES FILHO et al., 2018).

O modelo de biodigestor BLC se destaca por apresentar tecnologia mais simples, menor custo de construção e possibilitar o armazenamento do gás gerado (CALZA et al., 2016). Nesta configuração, o processo de estabilização dos dejetos ocorre por meio da digestão anaeróbia, processo bioquímico responsável pela degradação da matéria orgânica por diferentes microrganismos anaeróbios (BOND; TEMPLETON, 2011).

Todavia, a tecnificação desse sistema ainda é um grande desafio, devido a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia ser facilmente afetado por vários fatores, principalmente pela temperatura (LIN et al., 2016). A temperatura influencia diretamente na remoção do material orgânico e está atrelada a produção de biogás, Deng et al. (2014) relatam que em temperatura igual a 35°C há maior produção de biogás quando comparadas às temperaturas de 15, 20, 25 e 30°C. Esta maior produção segundo Chae et al. (2008), está associada a faixa de temperatura ótima de atividade

microbiana. Assim, reduções na temperatura do processo reduzem a atividade microbiana e conseqüentemente, a produção de biogás.

Contudo, apesar da consolidação desse fato na literatura, ainda há carência de estudos aplicados em biodigestores, uma vez que, a maioria dos processos monitorados em escala plena são em termos de eficiência do sistema (FERNANDES et al., 2014; MACHADO et al., 2016; VIANCELLI et al., 2013) e/ou viabilidade para produção de biogás (CALZA et al., 2016; FERRAREZ et al., 2015).

O conhecimento dos principais aspectos operacionais e dinâmica de degradação da matéria orgânica a partir de variáveis, como a temperatura, favorecem a creditação desta alternativa, além de trazer benefícios diretos na produção de biogás e influenciar diretamente na viabilidade econômica do processo (DENG et al., 2016). De forma geral, observa-se que o monitoramento dos biodigestores em escala plena, ainda é limitado e atêm-se apenas ao controle de parâmetros físicos e químicos requeridos pela legislação, somente na entrada e saída dos sistemas, não realizando o monitoramento das temperaturas que podem afetar o processo. Diante deste contexto, constata-se uma lacuna em termos da compreensão das variáveis que afetam diretamente a digestão anaeróbia, não sendo ainda esclarecidos e explorados a influência e relação de variáveis ambientais entre si e destas com a eficiência da degradação da matéria orgânica para este tipo de biodigestores.

Neste trabalho teve-se como objetivo avaliar as relações entre temperaturas no interior e exterior de biodigestores modelo lagoa coberta e destas com a remoção de matéria orgânica, assim como estudar tendências e comportamentos típicos das temperaturas em diferentes períodos do ano.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

O monitoramento foi realizado em uma suinocultura localizada no município de Teixeira, MG (Brasil). A granja trabalha em sistema de ciclo completo para a criação dos animais em confinamento, indo do nascimento até a terminação. A unidade possui 10.529 animais, sendo 831 matrizes e 18 varrões.

O sistema de tratamento dos efluentes é composto por um tanque de equalização que recebe os dejetos pela ação da gravidade, em seguida o efluente é bombeado de maneira semicontínua e aplicado em dois biodigestores modelo BLC operando em paralelo. Após o tratamento do efluente nos biodigestores, o efluente é

encaminhado para uma lagoa de estabilização, sendo aproveitado após o tratamento como fertilizante orgânico em áreas de pastagens na propriedade.

O biogás armazenado na cúpula do biodigestor é direcionado para um medidor de temperatura, em seguida para uma coluna de adsorção e posterior conversão em eletricidade em um motorizador modelo GMWM120 com potência de 120 kVA já interligado ao sistema de distribuição da CEMIG.

Os biodigestores foram construídos em trincheiras, formato de tronco de pirâmide invertido revestida no fundo e nas paredes com geocomposto de PVC flexível e cobertos com outra manta do mesmo material, formando a cúpula (reservatório do biogás). A Figura 3.1 apresenta o detalhamento das principais dimensões dos biodigestores.

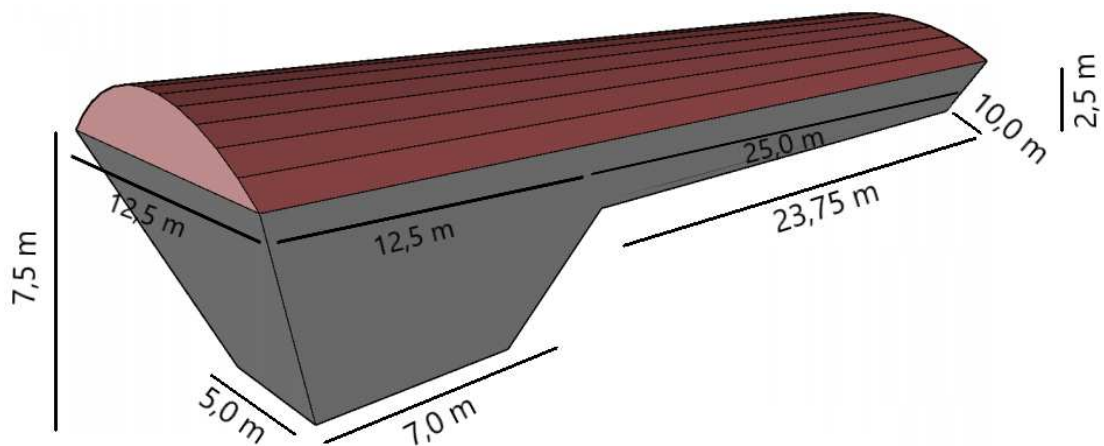


Figura 3. 1. Detalhamento das dimensões externas e internas dos biodigestores

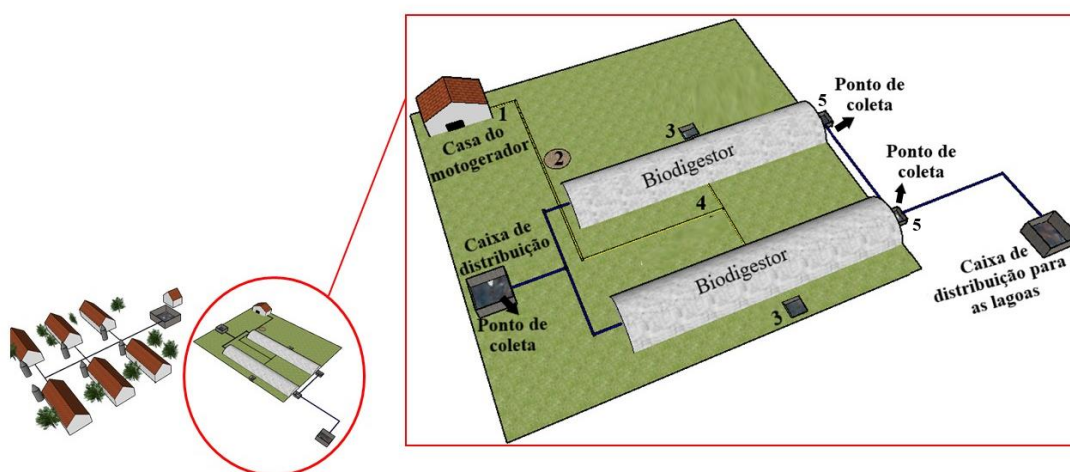
O tempo de detenção hidráulica dos efluentes no biodigestor foi determinado a partir da estimativa da vazão média de entrada dos efluentes no sistema e da capacidade volumétrica de cada unidade, que é igual a 1.250 m³.

A vazão foi determinada a partir de três métodos. O primeiro, corresponde ao produto do número de animais em cada fase de criação pelo seu respectivo volume de efluente gerado diariamente (L. animal⁻¹. d⁻¹), sendo para leitões (1,4 L), varrões (9,0 L), matrizes (16 L) e engorda (7 L) (Oliveira, 1983); O segundo, considerou um volume médio de dejetos produzido por animal da ordem de 10 L dejetos (MATOS e MATOS 2017), e por fim foi realizado medindo o tempo gasto para que o efluente ocupasse um recipiente com volume conhecido (método direto).

A carga orgânica em termo de DQO foi determinada a partir da estimativa da vazão do afluente versus valores de DQO encontrada no afluente pelo volume do biodigestor (AMARAL et al., 2019).

3.2.2 Monitoramento das temperaturas internas e externas dos biodigestores modelo lagoa coberta.

O monitoramento dos biodigestores com o intuito de avaliar as tendências e o padrão de variação da temperatura ao longo do tempo de operação dos biodigestores, foi realizado a partir da instalação de sensores na área experimental para a aferição das temperaturas no sistema. A Figura 3.2 apresenta o detalhamento das unidades de tratamento de dejetos na granja, assim como os locais onde os sensores para a mensuração de dados de temperatura foram instalados.



1- Ambiente, 2- Solo, 3- Substrato, 4- Biogás, 5- Efluente

Figura 3. 2. Croqui do sistema de tratamento dos efluentes da suinocultura com a indicação da localização dos sensores de temperatura no biodigestor.

Os sensores de temperatura eram conectados a um *datalogger* e por meio de roteadores presentes na granja os dados eram enviados por telemetria a uma central localizada no conhecimento em Bioenergia, situado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, onde os dados foram disponibilizados e armazenados em um sistema de gerenciador de dados (mysql) de forma contínua, em intervalos de 30 segundos, no período de Dezembro de 2017 a Dezembro de 2018. Estes dados foram tratados com o intuito de remover os *outliers* e demais dados inconsistentes. Este tratamento foi realizado a partir de um software em que realizava cortes estipulados em temperaturas máximas e mínimos para cada tipo de temperatura monitorada.

O monitoramento das temperaturas internas e externas ao biodigestor foi obtido a partir da geração de um banco de dados com valores de temperatura coletados a cada 30 segundos. Em seguida, foram organizados em médias diárias seguidas de médias mensais e desvio padrão. De forma complementar, gráficos box-plot apresentam as variações das temperaturas internas e externas ao longo do monitoramento.

O comportamento típico para um ciclo diário das temperaturas internas e externas do biodigestor ao longo do período monitorado foi expresso a partir de dados de temperatura coletados a cada 15 min para todos os dias do monitoramento. Em seguida, no mesmo horário realizou-se uma média.

O comportamento típico para um ciclo diário das temperaturas internas e externas do biodigestor ao longo do período monitorado foram subdividido em períodos verão (Fev./17 e Dez/17), outono (Mar. - Mai./18), inverno (Jun. - Ago./18) e primavera (Set. - Nov./18). Em seguida, comparou o comportamento das temperaturas nos períodos verão e inverno, classificados como solstícios e os períodos outono e primavera, consideradas como equinócios. A partir dessa análise foi possível verificar se há influência no comportamento das temperaturas considerando a variação no número de horas de radiação solar. Uma vez que, no período do solstício, há variação no número de horas de radiação solar entre o verão e inverno, já no equinócio, outono e primavera, os dias e as noites tendem apresentar a mesma variação.

3.2.3 Monitoramento da qualidade dos efluentes

O efluente foi caracterizado em termos de demanda química de oxigênio (DQO), série de sólidos e potencial hidrogeniônico (pH). O monitoramento do sistema foi iniciado em 7 de dezembro de 2017, sendo este considerado o primeiro dia operacional. Os valores de DQO foram monitorados no período de Dez./17 – Dez./18, sólidos totais (ST), Mar.– Dez./18, sólidos fixos (SF), voláteis (SV) e pH, no período de Ago. a Dez./18.

A caracterização dos efluentes na entrada e saída dos biodigestores foi realizada semanalmente. As análises em termos de DQO, série de sólidos e pH foram realizadas no Laboratório Qualidade Ambiental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa com base na metodologia indicada em APHA (2017). A caracterização do efluente na saída do sistema correspondeu a média dos resultados dos dois biodigestores operando em paralelo.

Os dados foram avaliados de forma agrupada para os períodos do verão (Dez./17, Fev./18 e Dez./18) e do inverno (Jun./18, Jul./18 e Ago./18). De forma complementar, os dados de DQO e série de sólidos foram avaliadas a partir das médias realizadas para os períodos de verão (Dez./17, Fev./18 e Dez./18), outono (Abr. – Mai/18), inverno (Jun –Ago./18) e primavera (Set. – Nov./18).

Gráficos box-plot foram utilizados para auxiliar na avaliação das tendências e características do efluente ao longo sistema de tratamento. A comparação entre as eficiências de DQO foi avaliada a partir de análise de variância com nível de significância 5%.

Por fim, foi estudado as correlações entre as temperaturas monitoradas e a eficiência de remoção da DQO, sendo os dados de DQO avaliados a partir de médias bimestrais das temperaturas. Ao estudo de correlações aplicou-se a análise do coeficiente de correlação de Pearson (r) com nível de 5% de significância (α) calculados pelo software SAEG UFV.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Tendência das variações térmicas diária

A Figura 3.3, apresenta o comportamento diário obtido a partir das médias horárias para todos os dias operacionais considerados.

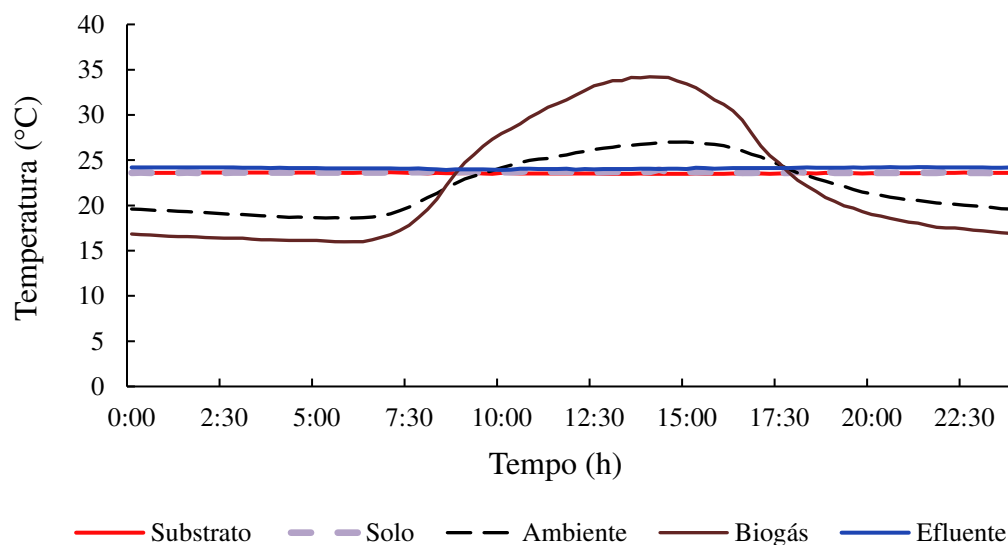


Figura 3. 3. Comportamento típico para um ciclo diário das temperaturas internas e externas do biodigestor para o período de Jan a Dez.18.

A partir da Figura 3.3 fica evidente a semelhança entre o comportamento da temperatura de biogás com a temperatura ambiente, no entanto, observa-se maior

amplitude térmica para a temperatura do biogás, sendo que na ausência de radiação solar a temperatura do biogás é menor que as condições ambientais e que durante o período de aquecimento, a temperatura do biogás supera a ambiente. Este comportamento da temperatura do biogás também foi observado por Hreiz et al. (2017), os quais observaram uma amplitude de até 10 °C ao longo do ciclo diário.

O biogás apresenta propriedades térmicas próximas das encontradas para o ar, apresentando baixo calor específico e alta difusividade térmica, o que contribui para uma maior oscilação da temperatura, além disso, esta variação da temperatura do biogás ao longo do ciclo diário pode estar associada ao aumento da temperatura ambiente e da incidência da radiação no biodigestor, sendo que a geomembrana da cúpula do biodigestor se aquece em virtude dos fenômenos de radiação e convecção. A parte externa da geomembrana absorve energia a partir dos raios solares e transmite o calor por condução para a superfície interna do biodigestor, e por meio da convecção aquece o biogás que está armazenado na cúpula do biodigestor (CASARIM, 2016; PERRIGAULT et al., 2012). Como consequência, o interior do biodigestor torna-se mais quente que a temperatura ambiente devido à baixa emissividade térmica dos gases (HREIZ et al., 2017). Por meio dos fenômenos, em especial da radiação e da convecção, há uma transferência de calor entre a fração gasosa (biogás) e a fração líquida (substrato).

Como observado, a temperatura do substrato não sofreu variações bruscas durante o comportamento diário, permanecendo em um padrão quase constante (Figura 3.3), comportamento também relatado por Hreiz et al. (2017), sendo justificado pela inércia térmica do material, assim como observado no solo e no efluente. Segundo Souza et al. (2011) materiais com alta inercia térmica contribui para reduzir a amplitude de variação da temperatura, favorecendo o atraso da condução do calor.

De acordo com Mendonça (2005), uma das formas de aumentar a inercia térmica de uma construções é mantê-la enterradas ao solo, como é observado nesta configuração de biodigestor, sendo que a fase líquida (substrato) fica na parte escavada, abaixo do nível do solo. Este configuração contribui para que a temperatura do substrato não apresente grandes oscilações (PHAM; TRIOLO; SOMMER, 2014), o que é essencial evitar condições adversas às atividades metabólicas dos microrganismos no processo de degradação.

Além disso, a capacidade de resistir às variações de temperatura pode ser associada as propriedades termo físicas tais como, condutividade térmica, difusividade térmica, umidade e a capacidade calorífica. Segundo Silans et al., (2006) materiais que possui baixo valor de difusividade térmica e elevado calor específico apresentaram maior amortecimento nas variações de temperaturas.

Dentre as temperaturas monitoradas no exterior dos biodigestores, as médias de temperaturas do solo e do substrato foram as mais próximas (Figura 3.3). Este comportamento também foi relatado por Hreiz et al. (2017), que apontam que o solo apresenta grande inercia térmica, o que proporciona pequenas e lentas variações de temperatura ao longo do tempo. De acordo com os autores, nos biodigestores as variações são reduzidas para um ciclo diário, e mais representativas quando se avaliam os comportamentos das temperaturas nos períodos mensais e anuais.

Em biodigestores modelo Bioköhler, instalado acima do nível do solo, encontrou-se comportamento diferente entre as temperaturas do biogás e do substrato. Tavares et al. (2016) relatam que a temperatura da parte superior do biodigestor (biogás) reduzia a medida que a temperatura inferior do biodigestor (substrato) aumentava com a elevação da temperatura ambiente ocasionada pelo nascer do sol e após pôr do sol este processo se invertia.

3.3.2 Comportamento das temperaturas nos períodos verão/inverno e outono/primavera.

As Figuras 3.4 e 3.5 indicam a média do comportamento diário das temperaturas para os períodos verão/inverno e outono/primavera.

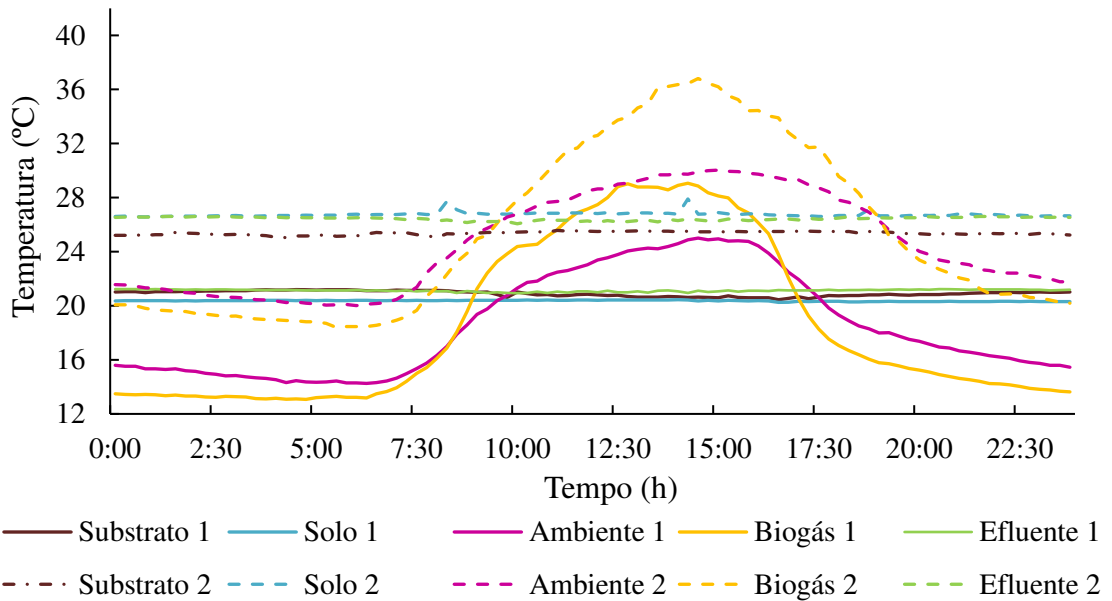


Figura 3. 4. Ciclo diário das temperaturas internas e externas ao biodigestor para o período de verão e inverno 2018.

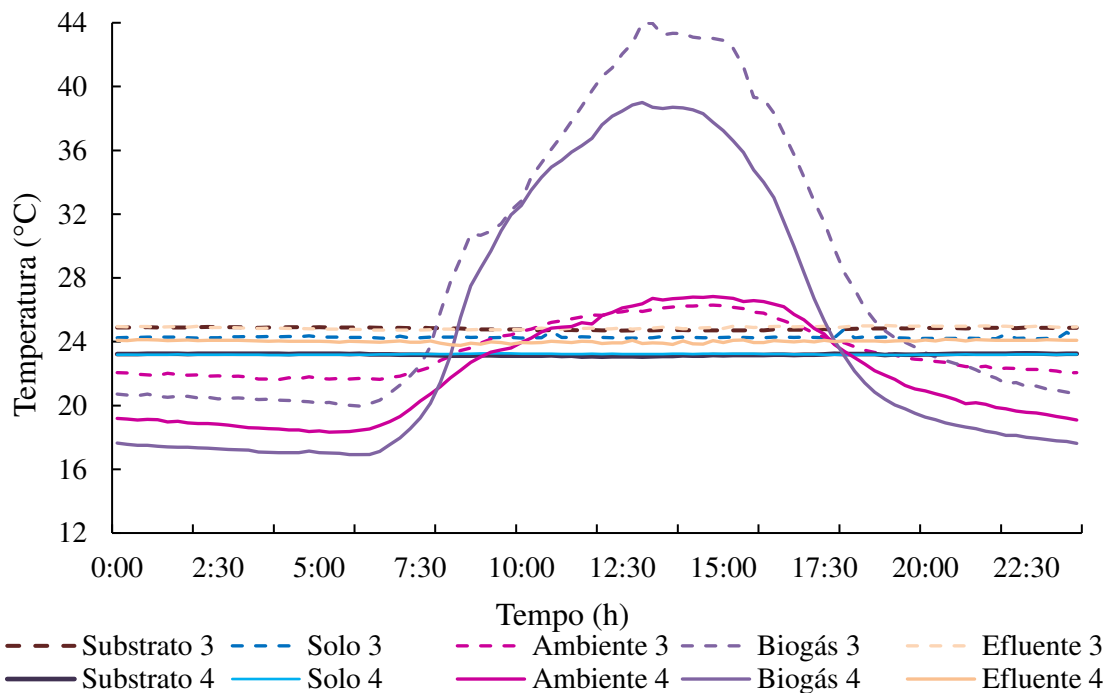


Figura 3. 5. Ciclo diário das temperaturas internas e externas ao biodigestor para o período de outono e primavera 2018.

Comparando o comportamento diário das médias das temperatura nos meses de verão com inverno (Figura 3.4) e outono com primavera (Figura 3.5) observa-se que seguem a mesma tendência no ciclo diário, porém com diferentes amplitudes nos meses avaliados.

As temperaturas horárias médias nos períodos de verão/inverno apresentaram maiores amplitudes quando comparadas às estações de outono/primavera (Figuras 3.4 e 3.5). No verão, os dias tendem a ser mais longos que as noites, consequentemente, receberam mais radiação solar que no inverno, onde as noites são mais longas que os dias, produzindo maiores variações no comportamento típico das temperaturas. Em adição, nos períodos outono e primavera os dias e as noites a exposição à radiação solar é mais equânime, apresentando uma menor variação entre as temperaturas horárias médias.

No período outono/primavera a temperatura do solo e do substrato apresentaram comportamento semelhante, ocasionando menor troca de calor entre elas, já nos períodos onde as horas de radiações solares se diferem (verão/inverno) observa-se que no verão a temperatura do solo foi superior a temperatura do substrato e que no período do inverno houve uma inversão entre essas temperaturas (Figura 3.4). Este comportamento pode estar associado às mudanças de temperatura do ambiente ocasionada a longo prazo (verão/inverno), influenciando no comportamento da temperatura do solo (HREIZ et al., 2017). Vale ressaltar que este padrão pode ser prejudicial ao processo de degradação anaeróbio, caso o biodigestor não tenha camadas de isolamento no período do inverno, uma vez que tende a perder calor para o solo.

A temperatura do biogás nos períodos inverno e primavera (Figura 3.4 e 3.5) apresentaram amplitude de variação menores e mais próximas da temperatura do ambiente quando comparadas aos períodos de verão e outono. Vaz (2019) simulando as perdas de calor de biodigestor modelo BLC relatou que no período de inverno a redução da temperatura ambiente implica em menores temperaturas do biogás e substrato.

A partir da simulação do comportamento térmico em biodigestores, Vaz (2019) ressalta que a principal via que ocasiona perdas de calor no biodigestor são as trocas térmicas que ocorrem por meio da cúpula do biodigestor. Já Casarim (2016) ressalta que em biodigestores sem aquecimento, as perdas da taxa de calor ocorrem por meio da entrada do afluyente e pelo contato com solo; em biodigestores com aquecimento, a principal perda se daria pela cúpula do biodigestor.

3.3.3 Monitoramento das temperaturas internas e externas ao biodigestor modelo lagoa coberta

O biodigestor anaeróbio modelo BLC operou em condições mesofílicas durante todo o monitoramento (Dez./17- Dez./18), apresentando temperatura do substrato mínima e máxima igual a 20,3°C (agosto) e 26,2°C (fevereiro e março), respectivamente. Segundo Bond e Templeton (2011) esta configuração de biodigestores é projetada para operar em faixas de temperatura mesofílicas (20 a 40°C) ou termofílicas (> 45). No entanto, em sistemas sem aquecimento, como do presente estudo, os biodigestores geralmente operaram em condições mesofílica (MERLIN et al., 2012).

A condição mesofílica se destaca por ser ideal para uma maior diversidade de microrganismos necessários no processo de biodigestão anaeróbia e são menos sensíveis a variações no sistema em comparação às arqueas termofílicas (KUNDU et al., 2014). Geralmente em países de clima tropical, como o Brasil, esta faixa de temperatura é propícia durante grande parte do ano, o que favorece a operação dos biodigestores nesta condição (GARFÍ et al., 2016).

A temperatura do efluente dentro do biodigestor (substrato) pode sofrer influência do calor liberado pela atividade microbiana que ocorre no processo anaeróbio, do calor liberado pela radiação solar incidente na cúpula do biodigestor e pela temperatura do afluente que entra no biodigestor (CASARIM, 2016). No entanto, segundo Perrigault et al. (2012) o calor liberado pela atividade microbiana pode ser considerada insignificante quando associada ao aquecimento do processo, sendo a incidência de radiação solar a principal fonte de aquecimento dos biodigestores. Segundo Vaz (2019) 84% da taxa de transferência de calor para o interior dos biodigestores no período do verão é ocasionada pela radiação solar.

Os principais fatores que podem influenciar nas taxas de absorção da radiação pelos biodigestores correspondem a posição de sua instalação em relação a incidência solar e a cor da cúpula dos biodigestores. Conforme Martí-Herrero et al. (2014), os biodigestores devem ser posicionados de maneira que recebam maior incidência da radiação solar durante o ano. No presente estudo, os biodigestores foram posicionados no sentido leste oeste.

Hreiz et al. (2017), Feiden et al. (2004) e Vaz (2019) sugerem a escolha da coloração preta para as geomembranas que recobrem as lagoas, por contribuir para

absorver o máximo de energia solar e dessa forma, otimizar a temperatura do sistema. De acordo com Bavutti et al. (2014), as geomembranas de cor preta possuem uma refletância de 4,8%, podendo proporcionar uma temperatura interna no biodigestor próxima a 46,0 °C em períodos de grande radiação solar. Ainda de acordo com os autores, as geomembranas de cor branca apresentam uma refletância típica de 77,6% com temperaturas máximas no interior do biodigestor de 38°C. O emprego de materiais com maior refletância traz benefícios ao sistema no verão, uma vez que nos períodos de elevadas temperaturas e variações térmicas abrupta, o processo de biodigestão anaeróbia pode ficar comprometido, em especial pela maior sensibilidade às variações ambientais das arqueas metanogênicas (CHAE et al., 2008; CASTRO; CORTEZ, 1998). Todavia, neste estudo a cor da cúpula era branca.

A Tabela 3.1 apresenta as médias mensais das temperaturas monitoradas no período de Dez/17 a Dez.18.

Tabela 3. 1. Média mensal das temperaturas monitoradas com seu respectivo desvio padrão.

MÊS	Biogás	Solo	Ambiente	Substrato	Efluente
Dez	n.a	24,7 ± 0,45	23,8 ± 1,26	25,1 ± 0,35	n.a
Jan	27,9 ± 2,69	27,9 ± 1,16	25,5 ± 1,28	26,2 ± 0,17	27,0 ± 0,24
Fev	25,8 ± 2,71	26,5 ± 0,89	24,0 ± 1,57	25,8 ± 0,21	26,0 ± 0,37
Mar	28,4 ± 2,74	26,1 ± 0,15	24,6 ± 1,32	26,2 ± 0,20	26,6 ± 0,27
Abr	26,0 ± 2,25	24,2 ± 0,50	21,5 ± 1,22	25,1 ± 0,45	25,0 ± 0,55
Mai	20,6 ± 4,47	22,4 ± 0,61	19,5 ± 2,08	23,4 ± 0,55	23,1 ± 0,65
Jun	18,9 ± 1,38	21,1 ± 0,21	19,0 ± 1,22	22,1 ± 0,21	21,7 ± 0,15
Jul	17,8 ± 1,55	19,8 ± 0,40	17,8 ± 1,34	21,2 ± 0,27	20,6 ± 0,45
Ago	19,4 ± 1,48	20,2 ± 0,33	19,2 ± 1,31	20,3 ± 1,07	21,0 ± 0,28
Set	20,6 ± 2,79	21,8 ± 0,32	20,3 ± 1,84	21,9 ± 0,38	22,4 ± 0,47
Out	n.a	23,8 ± 0,38	22,9 ± 1,95	23,9 ± 0,45	24,6 ± 0,38
Nov	n.a	24,1 ± 0,28	22,6 ± 1,95	23,8 ± 0,35	25,1 ± 0,33
Dez	23,7 ± 1,68	25,2 ± 0,86	24,5 ± 2,33	23,4 ± 1,76	26,3 ± 0,76

n.a não analisado

A temperatura no substrato variou de 26,2°C a 20,3 °C (Tabela 3.1), atingindo uma amplitude de variação de 5,9 °C comparando-se o mês mais quente (janeiro) com o mês mais frio (julho). As variações na temperatura do substrato aconteceram de forma gradual não ultrapassando 2,0 °C de um mês para o outro (Tabela 3.1). Segundo Amaral et al. (2019) e Chea et al. (2008), as alterações de temperatura no processo anaeróbio não devem ultrapassar 2,0 °C, afim de não comprometer a atividade microbiológica no processo e conseqüentemente, não reduzir a produção de biogás.

Dessa forma, as alterações de temperatura do substrato observadas nesse estudo estão dentro da faixa aceitável, não causando danos irreversíveis ao processo.

Observa-se que, as médias da temperatura ambiente apresentaram grandes variações durante todo o monitoramento, variando entre 17,8 a 24,6°C (Tabela 3.1), está temperatura foi inferior a obtida pelas temperaturas do substrato, ao longo de todo o período monitorado. Este comportamento ao se avaliar as temperaturas ambiente e do substrato no interior do biodigestor também é relatada em Martí-Herrero et al. (2014) e Perrigault et al. (2012) os quais, estudaram o comportamento das temperaturas em biodigestores tubulares de baixo custo.

Em biodigestores sem isolamento, como o deste estudo, tem-se a transferência de calor entre o substrato para o solo, biogás e ambiente (HREIZ et al., 2017; PHAM; TRIOLO; SOMMER, 2014). A partir da Tabela 3.1 observa-se que nos meses de Jan./Fev./Nov./Dez. as médias mensais da temperatura do substrato foram inferiores às médias da temperatura do solo, observando-se uma transferência de calor do solo para o interior do biodigestor. Em contrapartida, nos meses Mai./Jun./Jul. a temperatura do substrato foi superior às médias da temperatura do biogás, tendo-se a transferência de calor no sentido do substrato para o biogás.

A Figura 3.6 apresenta o gráfico box-plot com as variações das temperaturas internas e externas ao longo do período do monitoramento (Dez./17 – Dez./18).

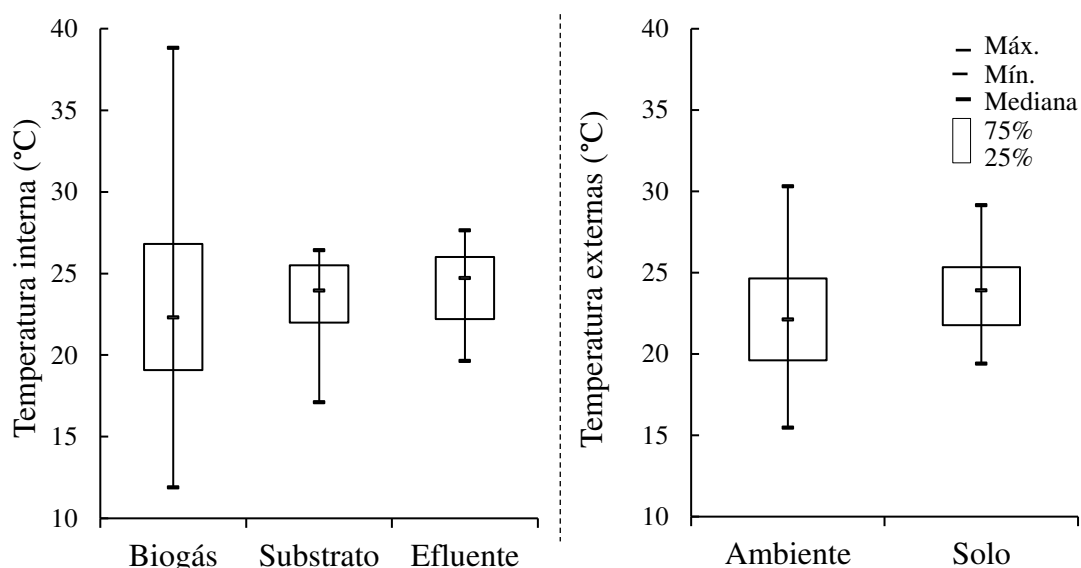


Figura 3. 6. Variações das temperaturas internas e externas ao biodigestor lagoa coberta no período monitorado (Dez./17 – Dez./18).

As médias mensais da temperatura do biogás, seguida do ambiente e do solo apresentaram maior variação de temperatura quando comparadas com as médias da

temperatura do efluente e do substrato (Figura 3.6). Esta maior variação obtida nos dados de temperatura do biogás, pode ser associada a zona de armazenamento do biogás, que recebe interferência direta da radiação solar, causando maior oscilação das temperaturas, como já reportado por (MARTÍ-HERRERO et al., 2019).

Em adição, pode-se observar grande semelhança na distribuição dos dados de temperatura do efluente e do substrato, os quais variaram entre 26,6 a 20,6 °C (Figura 3.6).

3.3.4 Monitoramento do sistema de tratamento

A produção volumétrica diária de dejetos na propriedade estudada foi estimada em 110 m³ d⁻¹ quando considerando dados referentes às diferentes fases de criação dos animais, 105 m³ d⁻¹ a partir de dados de volume médio para todos os animais e 160 m³ d⁻¹ pelo método direto de vazão. Assim, para fins de avaliação do sistema de tratamento, considerou-se como vazão do sistema o valor de 125 m³ d⁻¹, média dos três métodos avaliados. A partir da estimativa da vazão e do volume dos biodigestores, estimou-se que o sistema de tratamento possui um tempo de retenção hidráulica da ordem de 20 dias. Segundo Palhares e Gebler, (2014) o tempo de retenção hidráulica em biodigestores desta configuração variam entre 20 a 40 dias. Desta forma, o biodigestor anaeróbio está operando dentro da faixa esperada, entretanto, vale ressaltar que ao longo do ano pode haver variações da vazão decorrente do manejo da granja, ocasionado modificação no tempo de retenção hidráulica.

A carga orgânica volumétrica em termos de DQO aplicada nos biodigestores variou-se entre 0,6 - 1,7 kg m⁻³ d⁻¹. Nos meses de Dez/2017 a Mai./2018 a aplicação da carga orgânica foi superior a faixa sugerida por Coelho et al. (2018) de 0,3 a 1,0 kg m⁻³ d⁻¹.

As Figuras 3.7 e 3.8 indicam as variações de DQO e ST em função da temperatura ambiente e do substrato ao longo do período monitorado, respectivamente.

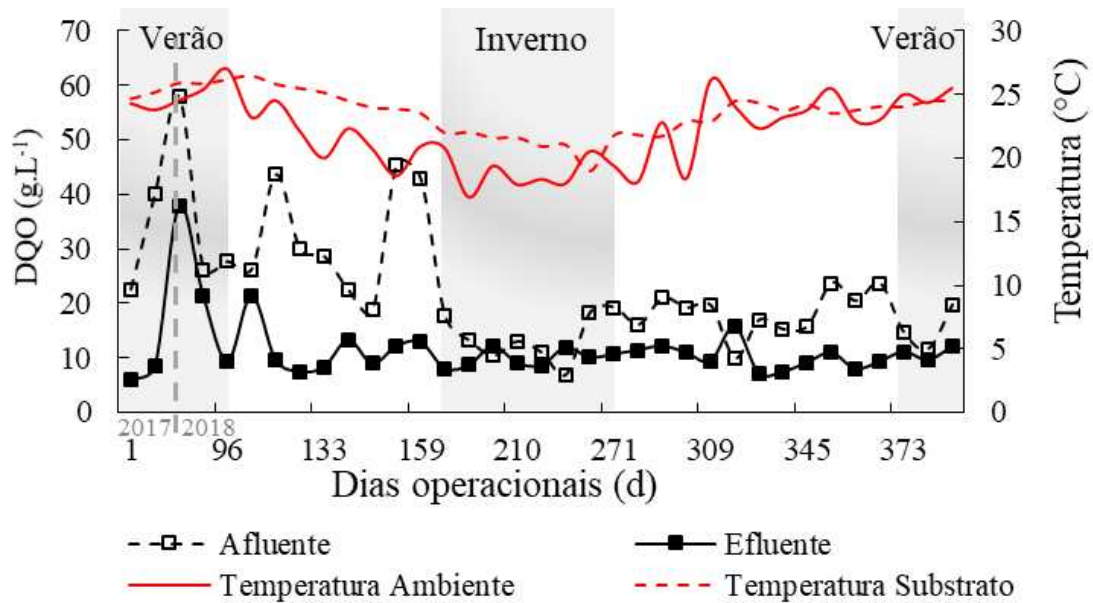


Figura 3. 7. Comportamento das variações de DQO ao longo dos dias operacionais.

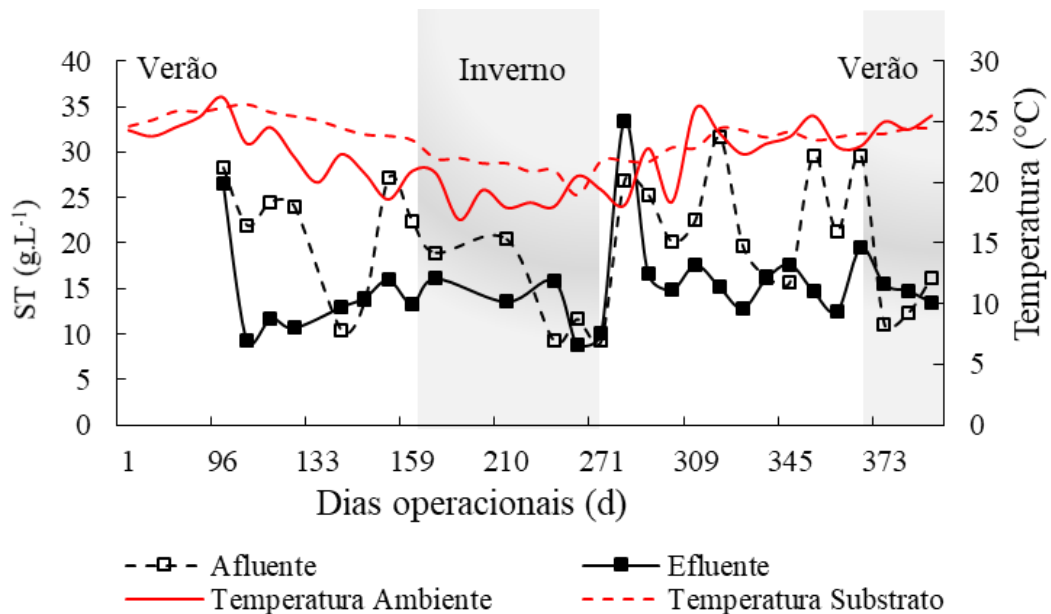


Figura 3. 8. Comportamento das variações de Sólidos Totais ao longo dos dias operacionais.

De acordo com os dados, pode-se apreender que os valores de DQO do afluente apresentaram maior variação no início do monitoramento, sendo observada uma redução destes valores no período correspondente ao inverno (Figura 3.7).

De forma geral, os dados de DQO na saída dos sistemas ficaram mais estabilizados ao longo do período avaliado. Para os ST, o monitoramento iniciou a partir do mês de março, observou-se grandes oscilações ao longo do ano (Figura 3.8). Além das influências ambientais nas características dos efluentes de entrada e saída dos biodigestores, o comportamento de DQO e ST podem estar associadas ao padrão

de consumo de água na propriedade, manejo dos dejetos e oscilações sazonais da produção, a qual é mais evidente no final do ano devido às elevadas vendas de suínos, período que coincide com o verão.

Segundo Matos e Matos (2017), a composição do afluente está diretamente relacionada ao manejo da granja ao longo do ano, uma vez que, há oscilações no volume de água utilizada para higienização das baias, no volume gerado de urina e fezes, além do desperdício de água e ração pelos animais, o que conseqüentemente, altera as características físicas e químicas do afluente.

As temperaturas do ambiente e do substrato (efluente em tratamento, no interior do biodigestor) apresentam comportamento semelhante ao longo do ano (Figura 3.7 e 3.8). No entanto, a temperatura ambiente apresentou maior oscilação quando comparada com a temperatura do substrato, indicando um amortecimento das variações de temperatura no interior do biodigestor. A partir dos dados do monitoramento, as temperaturas médias do ambiente e do substrato foram de 24,8°C e 24,9 °C, e de 18,8 °C e 21,1°C, para os períodos de verão e inverno, respectivamente.

De forma complementar, a Tabela 3.2 apresentada a estatística descritiva para os valores de DQO e a série de sólidos para o período monitorado.

Tabela 3. 2. Característica do efluente de suinocultura em relação aos valores de DQO e série de sólidos para o período de Dez/2017 a Dez/2018.

Meses	DQO		ST		SF		SV	
	Afluente (g.L ⁻¹)	Efluente (g.L ⁻¹)	Afluente (g.L ⁻¹)	Efluente (g.L ⁻¹)	Afluente (g.L ⁻¹)	Efluente (g.L ⁻¹)	Afluente (g.L ⁻¹)	Efluente (g.L ⁻¹)
Dez. /Fev.	34,3	14,3	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a
Mar./Abr./mai.	30,4	11,0	21,2	14,3	n.a	n.a	n.a	n.a
Jun./Jul./Agos.	12,3	9,6	17,5	14,2	4,4	5,1	8,7	7,6
Set./Out./Nov.	18,0	10,0	21,3	16,1	8,5	6,9	13,7	8,8
Dez.	15,0	10,9	13,0	14,6	3,8	5,0	9,1	9,5
Mínimo	12,3	9,6	13,0	14,2	3,8	5,0	8,7	7,6
Máximo	34,3	14,3	21,3	16,1	8,5	6,9	13,7	9,5
Média	22,0	11,2	18,3	14,8	5,6	5,7	10,5	8,6

DQO- demanda química de oxigênio, ST- Sólidos totais, SF- sólidos fixos, SV- sólidos voláteis, n.a – não avaliado.

Como pode-se aprender a partir de valores médios obtidos para cada estação do ano no período de Dez/17 a Dez/18, os valores de DQO no afluente variaram de 34,3 a 12,3 g.L⁻¹, com valor médio de 22,0 g.L⁻¹. Para o efluente de saída, as médias alcançaram valores máximos, mínimos e médios de 14,3, 9,6 e 11,2 g.L⁻¹, respectivamente (Tabela 3.2).

Estes valores médios de DQO para entrada e saída do sistema foram próximos ao obtido por Silva et al. (2015) e Fernandes et al. (2014), os quais estudaram efluentes de suínos em terminação tratados por dois biodigestores em série. O primeiro estudo obteve média igual a 30,8 g.L⁻¹ para o afluente e 12,5 g.L⁻¹ para o efluente de saída após o segundo biodigestor, no segundo trabalho os valores médios foram de 30,0, 21,6 e 14,2 g.L⁻¹ para o efluente de entrada e saída do primeiro e segundo biodigestor, respectivamente. Contudo, em sistemas de ciclo completo utilizando biodigestores em paralelo, segundo Veloso et al. (2018), os valores médios para o afluente foram de 25,2 g.L⁻¹ e 5,6 g.L⁻¹ para o efluente e os encontrados por Machado et al. (2016) foram iguais a 47,85 g.L⁻¹ e 15,23 g.L⁻¹ para o afluente e efluente, respectivamente.

Ainda de acordo com a Tabela 3.2, o teor de ST apresentou valores médios para os efluentes de entrada e saída igual a 18,3 g.L⁻¹ e 14,8 g.L⁻¹, respectivamente, sendo estes próximo aos teores médios de ST encontrados por Machado et al. (2016) os quais, obtiveram na entrada do sistema valores de 19,2 g.L⁻¹ e 13,4 g.L⁻¹ para saída dos efluente no sistema. Em termos gerais, observa-se que a fração orgânica dos efluentes de entrada varia na faixa de 61,2 - 76,4% de ST, o que representa um elevado potencial do efluente de suinocultura à degradação, o que pode favorecer a conversão de matéria orgânica a biogás. A fração orgânica está em consonância com os dados apresentados por Oliveira e Higarashi (2006), os quais variaram no intervalo de 70 a 75%.

A Figura 3.9 apresenta o gráfico box-plot com as variações de DQO e sua eficiência de remoção nos períodos do verão e inverno.

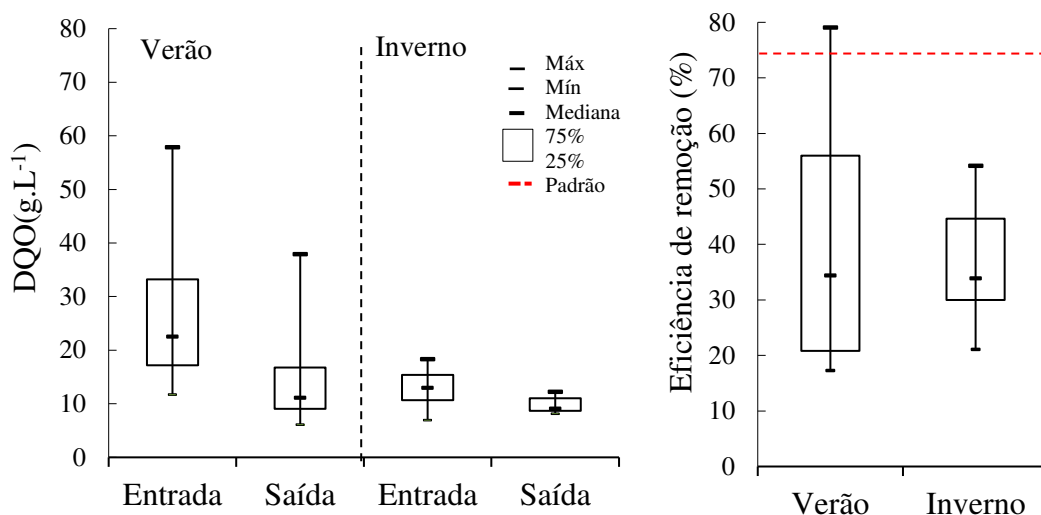


Figura 3. 9. Gráfico box-plot para a DQO e eficiência de remoção em termos de DQO nos períodos quente e frio.

A eficiência média de remoção de DQO foi igual a 40,6% no período do verão e 36,8% no período do inverno. Verifica-se que mais de 50% das eficiências dos períodos verão e inverno estão abaixo do esperado para este modelo de biodigestor (Figura 3.9), visto que se esperam reduções da carga orgânica de pelo menos de 40% (SILVA et al., 2015). O baixo rendimento do sistema pode ser relacionado a temperatura do substrato, uma vez que, a temperatura máxima do substrato apresentou valor reportado abaixo da faixa ótima para os microrganismos mesofílicos (35 - 37°C) (BAVUTTI et al., 2014; AMARAL et al., 2017). Assim, acredita-se que a temperatura abaixo do ideal contribuiu para reduzir a atividade microbiana e consequentemente a eficiência do sistema.

Contudo as médias das eficiências dos dois períodos estão em consonância com os valores observados em Silva et al. (2015) (41%), Viancelli et al. (2013) (47%), superior ao encontrado por Fernandes et al. (2014) (28%) e abaixo do obtido por Machado et al. (2016) (68%). De forma geral, observa-se que a eficiência de remoção de DQO entre os períodos de verão e inverno não diferiu estatisticamente para o nível de significância de 5%.

Após o tratamento via biodigestores modelo BLC, observa-se que o efluente ainda não atende ao padrão de lançamentos de efluentes em corpos hídricos. A normativa COMPAM/CERH-MG n°01/08 determina uma redução mínima de 70% da carga orgânica quantificado por DQO ou 75% em média anual, tendência já reportada como característica dos sistemas anaeróbios, os quais requerem pós-tratamento (COPAM, 2008). Tal condição foi somente atendida apenas em alguns dias

operacionais (Figura 3.9), o que já era esperado para sistemas anaeróbios e justifica o sistema de pós-tratamento (lagoas de estabilização).

A Figura 3.10 apresenta o gráfico box-plot para a concentração de ST e sua eficiência de remoção nos períodos de verão e inverno. Pode-se apreender a partir dos dados que não se observou variações expressivas em termos de teores de sólidos na entrada e saída dos biodigestores, para as estações avaliadas.

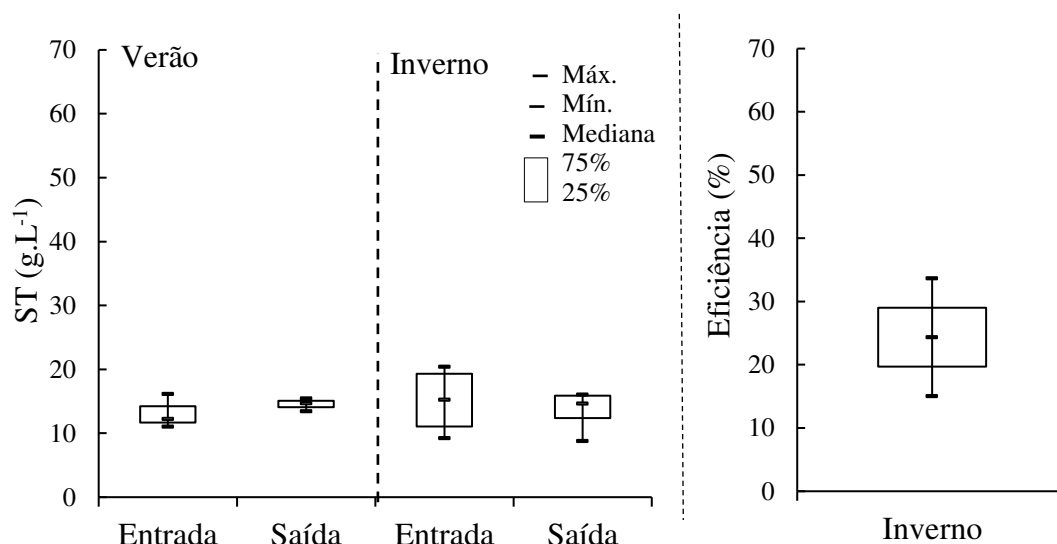


Figura 3. 10. Gráfico box-plot para ST e eficiência de remoção nos períodos quente e frio.

Os valores de ST não apresentaram variações consideráveis entre a entrada e saída do sistema, assim como foram pouco influenciados em termos de temperatura, a partir da avaliação das estações de verão/inverno (Figura 3.10). No período do inverno, a eficiência de remoção de ST apresentou média igual a 24,3.

Esta baixa remoção de sólidos pode ser associada segundo Amaral et. al., (2019) a configuração de biodigestor, uma vez que nestes sistemas anaeróbios normalmente não há um separador de sólidos antes da entrada do biodigestor e geralmente não possui sistema de agitação otimizados. Assim, ocorre um elevado acúmulo de materiais orgânicos no fundo do reator, ocasionando a redução do volume útil do biodigestor, o que, resulta em menor tempo de TRH e sobrecarrega o sistema anaeróbio. Como foi observado neste estudo.

Os valores médios de pH para o efluente de entrada e saída foram de 6,9 e 7,4, respectivamente. Esses valores de pH estão em consonância com os obtidos por Veloso et al. (2018), Machado et al. (2016) e Silva et al. (2015), em que encontraram valores médios de pH para o efluente de entrada igual a 7,4, 6,8 e 7,2, respectivamente, e para o efluente de saída todos os autores obtiveram média igual a 7,6.

A faixa de pH obtida neste estudo está dentro da faixa de pH entre 6,0 a 8,0, sendo esta, considerada favorável para o processo anaeróbio (CHERNICHARO, 2008). De acordo com Amaral et al. (2019), os valores mais indicados para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas compreendem valores de pH dentro da faixa de 6,7 a 7,5, o que foi observado em grande parte do monitoramento.

3.3.5 Estudo da correlação entre as temperaturas e a eficiência de remoção da DQO

A Tabela 3.3 apresenta as correlações entre as temperaturas monitoradas no interior e exterior dos biodigestores modelo Lagoa Coberta.

Tabela 3.3. Valores de correlação linear entre temperaturas no interior e exterior dos biodigestores e a eficiência de remoção de DQO.

	Eficiência de remoção de DQO	Temperatura Biogás	Temperatura Solo	Temperatura Ambiente
Temperatura Biogás	0,36 (0,2765 ^{n.s})			
Temperatura Solo	0,31 (0,3044 ^{n.s})	0,96 (0,0051)		
Temperatura Ambiente	0,16 (0,3994 ^{n.s})	0,87 (0,0265)	0,96 (0,0051)	
Temperatura Substrato	0,42 (0,2410 ^{n.s})	0,94 (0,0084)	0,97 (0,0035)	0,86 (0,0311)

() p-valor, * não significativo

De forma geral, os resultados indicaram que as médias mensais das temperaturas apresentaram elevada correlação linear e diferiram estatisticamente entre si.

A temperatura do substrato apresentou maior correlação com a temperatura média mensal do solo ($r=0,96$), seguida da temperatura do biogás ($r=0,94$) e por fim, da temperatura ambiente ($r=0,85$) (Tabela 3.3). A associação entre as temperaturas citadas reforça o que já foi apresentado anteriormente, de que a temperatura do substrato é fortemente influenciada da pelas temperaturas do solo e do biogás, devido à transferência de calor entre as fases, como também atestado por (HREIZ et al., 2017).

A temperatura do ambiente apresentou elevada correlação com a temperatura do solo ($r=0,95$), seguido do biogás ($r=0,87$) e do substrato ($r=0,85$). A forte associação entre as temperaturas do ambiente e do solo também foi observado por Xing et al.

(2018), os autores ao avaliaram a influência dos parâmetros meteorológicos (temperatura do ar, radiação solar, umidade, precipitação e velocidade do vento) na temperatura do solo medida a uma profundidade de 1 metro, obtiveram que a temperatura ambiente foi o fator que mais influenciou a temperatura do solo, apresentando correlação de 0,91.

Em adição, ao se avaliar a associação entre a temperatura do solo e as demais temperaturas monitoradas, observaram-se boas associações, sendo o coeficiente de correlação igual a 0,97 para com a temperatura do substrato, e de 0,96 com a temperatura do ambiente e do biogás. Essa maior associação com o substrato pode ser associada as trocas térmicas que ocorrem entre o solo e o biodigestor tendendo ao equilíbrio, como também já discutido anteriormente.

Quando avaliada a correlação linear entre as temperaturas monitoradas com a eficiência de remoção de DQO foi observado que não há uma correlação linear entre as temperaturas, uma vez que, o p-valor foi maior que o nível de significância de 5%. No entanto, observou-se associação com as temperaturas do substrato, seguida das temperaturas do biogás, solo e ambiente. A melhor associação aponta que 42% dos dados de eficiência de remoção de DQO podem ser explicadas pela temperatura do substrato. Neste caso, outros fatores que não as influências da temperatura devem ser consideradas, como a carga orgânica aplicada, o manejo dos dejetos na granja, os quais variam de forma sazonal ao longo do ano, condições hidráulicas dos biodigestores, dentre outros.

3.4 CONCLUSÕES

Diante do monitoramento dos biodigestores, conclui-se que a eficiência do sistema de tratamento apresenta pequenas oscilações durante o ano. As principais interferências podem estar associadas ao manejo dos dejetos na granja e as variações da temperatura ao longo do ano em biodigestores sem aquecimento.

A eficiência de remoção de DQO entre os períodos de verão e inverno não diferiram estatisticamente para nível de significância de 5%.

Nos biodigestores lagoa coberta, observa-se uma grande troca de calor entre as temperaturas do substrato com a temperatura do solo e do biogás. E que a sazonalidade influencia nessas transferências de calor.

A temperatura ambiente e do biogás apresentam maior oscilações térmicas ao longo do monitoramento, em adição, a temperatura do substrato não sofre variações bruscas e se aproxima mais da temperatura do solo e do efluente.

A eficiência de remoção de DQO não apresenta correlação linear entre as temperaturas, mas apresenta grande associação entre as temperaturas internas do biodigestor, substrato e biogás.

3.5 REFERÊNCIAS

AMARAL, A. C., STEINMETZ, R. L. R., KUNZ, A. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 1ª ed. Concórdia: SBERA: Embrapa Suínos e Avez: 2019, 209p.

APHA. American Public Health Association, & American Water Works Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. American public health association. 2017.

BAVUTTI, M., GUIDETTI, L., ALLESINA, G., LIBBRA, A., MUSCIO, A., & PEDRAZZI, S. 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.

BOND, T., TEMPLETON, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable development*. Energia para o desenvolvimento sustentável, v. 15, n.4, p.347-354. 2011.

CALZA, L. F., DE LIMA, C. B., NOGUEIRA, C. E. C., SIQUEIRA, J. A. C., & SANTOS, R. F. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, 2015.

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. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 1, p. 1–6, 2008.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2ª ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2007, 380 p.

CASARIN, M. A. **Microgeração distribuída de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos: uma contribuição para a sustentabilidade da suinocultura**. Dissertação de mestrado - Florianópolis, SC, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

CASTRO, L. R., CORTEZ, L. A. B. Influência da temperatura no desenvolvimento de biodigestores com esterco bovino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n.1, p.97-102.1998.

COELHO, S. T. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás; Part. II Biometano**. São Paulo: IEE-USP, 218p. 2018

COPAM- **Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação normativa**

conjunta nº 01, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151> Acesso em: 25 de maio 2019.

DENG, L., YANG, H., LIU, G., ZHENG, D., CHEN, Z., LIU, Y., XIAODONG, P., DONG, L., WANG, Z., LEI, Y. Kinetics of temperature effects and its significance to the heating strategy for anaerobic digestion of swine wastewater. **Applied energy**, v. 134, p. 349-355, 2014.

DENG, L., CHEN, C., ZHENG, D., YANG, H., LIU, Y. E CHEN, Z. Effect of temperature on continuous dry fermentation of swine manure. **Journal of environmental management**, v. 177, p. 247-252, 2016.

FEIDEN, A., REICHL, J., & SCHWAB, J. Avaliação da eficiência de um biogestor tubular na produção de biogás a partir de águas residuárias de suinocultura. **Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural**. 2004.

FERNANDES, D. M., COSTANZI, R. N., FEIDEN, A., DE SOUZA, S. N. M., KITAMURA, D. S. .Processo de biodigestão anaeróbia em uma granja de suínos. **Ambiência** v. 10, n. 3, p.741-754, 2014

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-Journal Of Engineering, Architecture And Technology Innovation**, v.6, n.1, p. 67-84, 2018.

FERRAREZ, A. H., OLIVEIRA FILHO, D., GRACIA, L. M. N., MARTINEZ, J. M., LOPES, R. P., DA SILVA JÚNIOR, A. G., & DE SOUZA, N. S. Potencial de geração de eletricidade com codigestão de resíduos agropecuários na região da zona da mata, minas gerais, brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 302-316, 2015.

GARFÍ, M., MARTÍ-HERRERO, J., GARWOOD, A., FERRER, I. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**,v. 60, p. 599-614, 2016.

HREIZ, R., ADOUANI, N., JANNOT, Y., PONS, M. N. Modeling and simulation of heat transfer phenomena in a semi-buried anaerobic digester. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 119, p. 101-116, 2017.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Pecuária municipal**, v. 44, 2016.

KONZEN, E. A. Dejetos de suínos fermentados em biodigestores e seu impacto ambiental como insumo agrícola. In Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO GOIANO DE AVICULTURA, 7.; SIMPÓSIO GOIANO DE SUINOCULTURA, 2., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: AVESUI Centro-Oeste, p. 56-64. 2005.

LIN, Q., DE VRIEZE, J., HE, G., LI, X., & LI, J. Temperature regulates methane

production through the function centralization of microbial community in anaerobic digestion. **Bioresource technology**, v. 216, p.150-158, 2016.

MACHADO, N. S., DA SILVA, J. N., DE OLIVEIRA, M. V. M., COSTA, J. M., BORGES, A. C. Remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás da fermentação anaeróbia de dejetos de suínos utilizando óxido de ferro, hidróxido de cálcio e carvão vegetal. **Energia na agricultura**, v. 30 n.4, p.344-356, 2015.

MARTÍ-HERRERO, J., ALVAREZ, R., ROJAS, M. R., ALIAGA, L., CÉSPEDES, R., CARBONELL, J.. Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. **Bioresource technology**, v. 167, p. 87-93, 2014.

MARTÍ-HERRERO, J., SORIA-CASTELLÓN, G., DIAZ-DE-BASURTO, A., ALVAREZ, R., & CHEMISANA, D. Biogas from a full scale digester operated in psychrophilic conditions and fed only with fruit and vegetable waste. **Renewable energy**, v. 133, p. 676-684, 2019.

MATOS, A. T. DE; MATOS, M. P. DE. **Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2017 371 p.

MENDONÇA, P. **Habitar sob uma segunda pele - Estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados**. Tese de doutorado, Guimarães : Portugal, Universidade do Minho, 2005.

MERLIN, G., KOHLER, F., BOUVIER, M., LISSOLO, T., BOILEAU, H. Importance of heat transfer in an anaerobic digestion plant in a continental climate context. **Bioresource technology**, v.124, p.59-67, 2012.

MCAULIFFE, G. A.; TAKAHASHI, T.; MOGENSEN, L.; HERMANSEN, J. E.; SAGE, C. L.; CHAPMAN, D. V.; LEE, M. R. F. Environmental trade-offs of pig production systems under varied operational efficiencies. **Journal of Cleaner Production**, v.165 p. 1163 – 1173, 2017.

OLIVEIRA, P. A. V. DE; HIRAGASHI, M. M.; EMBRAPA. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. **Documentos / Embrapa**, v. 1, p. 42, 2006.

OLIVEIRA, P.A.V. **Manual de Manejo e utilização de dejetos suínos**. Concórdia, SC. 1993.

PALHARES, J. C.P., GEBLER, L. **Gestão ambiental na agropecuária**. Brasília, DF, EMBRAPA, 2014, v.2, 490p.

PERRIGAULT, T., WEATHERFORD, V., MARTÍ-HERRERO, J., POGGIO, D. 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., 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.

SILANS, A. P., DA SILVA, F. M., DOS REIS BARBOSA, F. D. A. Determinação in

loco da difusividade térmica num solo da região de caatinga (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30 n.1, p.41-48. 2006.

SILVA, F. P., BOTTON, J. P., DE SOUZA, S. N. M., HACHISUCA, A. M. M. Parâmetros físico-químicos na operação de biodigestores para suinocultura. **Revista Tecnológica**, p.33-41. 2015.

SOUZA, H. A.; 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. **Ambient. constr.**,v. 11, n. 4, p. 113-128, 2011.

TAVARES, S. G., FEIDEN, A., CORREIA, A. F., SOAREZ, C. M. T., GREGOLIN, M. R. P. Influência das variações térmicas climáticas na produção de biogás. **Nativa**, p. 287-295, 2016.

VAZ, P. N. **Simulação e proposição de estratégia de controle para biodigestor fluxo tubular**. Dissertação de mestrado, Viçosa, MG: Brasil, Universidade Federal de Viçosa, 2019.

VELOSO, A. V., CAMPOS, A. T., MARIN, D. B., MATTIOLI, M. C., NÉRI, A. C. Sustentabilidade ambiental da suinocultura com manejo de dejetos em biodigestor-avaliação de parâmetros físico-químicos. **Revista Engenharia na Agricultura**,v. 26, n. 4, p.322-333.

VIANCELLI, A., KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., KICH, J. D., SOUZA, C. K., CANAL, C. W., COLDEBELLA, A. ESTEVES, P. A., BARARDI, C. R. M. Performance of two swine manure treatment systems on chemical composition and on the reduction of pathogens. **Chemosphere**, v. 90, n. 4, p. 1539-1544, 2013.

XING, L., LI, L., GONG, J., REN, C., LIU, J., CHEN, H. Daily soil temperatures predictions for various climates in United States using data-driven model. **Energy**, v.160, p.430-440, 2018.

4. CONCLUSÃO GERAL

O emprego de biodigestores anaeróbios modelo lagoas coberta no estado de Minas Gerais ainda é reduzido, sendo predominante nas regiões do Triângulo Mineiro/Alto do Paranaíba seguida da Zona da mata.

As granjas classificadas em grande porte, apresentam maior potencial para produção de biogás e conseqüentemente, energia elétrica.

As granjas que possuem biodigestores instalados poderiam suprir diariamente a demanda energética de 65 mil habitantes se realizassem o aproveitamento do biogás em forma de energia elétrica.

A partir do monitoramento realizado na suinocultura localizada em Teixeira-MG, verificou-se que as temperaturas ambiente e do biogás são as que mais oscilam ao longo do ciclo diário e que a temperatura do solo e do substrato permanecem quase constante. A temperatura média mensal do substrato se correlacionou melhor com a temperatura média mensal do solo, seguida da temperatura do biogás e por fim, com a temperatura do ambiente.

Os biodigestores modelo lagoas coberta estão operando com eficiência de remoção da matéria orgânica abaixo do esperado para esta configuração. Em relação aos períodos do verão e inverno, não houve diferença estatística entre a remoção da matéria orgânica. No entanto, observou-se que a temperatura do substrato nos dois períodos, verão e inverno, foi inferior a temperatura ótima para os microrganismos anaeróbios.

E por fim, verificou-se que não houve correlação linear entre as temperaturas monitoradas e a eficiência de remoção de DQO.

4.1 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISA

Diante dos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se para pesquisas futuras:

- ✓ Estudar a caracterização do efluente de entrada em termos de nutrientes, substâncias tóxicas e metais pesados que possam inibir a atividade metanogênica.
- ✓ Determinar a taxa de transferência de calor entre a temperatura do efluente interno do biodigestor e as temperaturas ambiente, solo e biogás. E a partir disso, propor alternativas para que as perdas sejam minimizadas.
- ✓ Avaliar outras variáveis ambientais, como vento, radiação solar, precipitação, umidade, entre outras, que podem interferir na temperatura interna do biodigestor.

- ✓ Avaliar a influência da sazonalidade na produção e composição do biogás.
- ✓ Correlacionar a produção de biogás com a remoção de DQO.
- ✓ Determinar a classe dos microrganismos que predominam no biodigestor e a partir desta, determinar uma temperatura ótima para melhorar a eficiência do processo.
- ✓ Propor métodos de automatização para o biodigestor, para que opere em temperatura constante.
- ✓ Avaliar a eficiência da recirculação dos efluentes no processo de biodigestão.
- ✓ Avaliar a lixiviação de nutrientes disposto no solo por meio da fertirrigação e a partir disso, avaliar o impacto ambiental em termos de qualidade da água e solo nas propriedades que fazem a disposição deste resíduo no solo.