

ENERGIA SOLAR COMO FONTE ALTERNATIVA DE AQUECIMENTO EM BIODIGESTORES LAGOA COBERTA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

**ANTONELLA ARAUJO DE ALMEIDA¹, PRISCILA DA SILVA MARADINI²,
IZABELLE DE PAULA SOUSA³, ANDRÉ PEREIRA ROSA⁴**

¹ Graduanda em Engenharia Agrícola e Ambiental, UFV, Viçosa-MG. Bolsista do CNPq – Brasil. Fone: (21) 97124-4930. e-mail: antonella.almeida@ufv.br

² Engenheira Ambiental, Mestranda em Engenharia Agrícola, DEA/UFV, Viçosa-MG. Fone: (31) 99553-2248. e-mail: priscila.maradini@ufv.br

³ Engenheira Agrícola e Ambiental, Doutoranda em Engenharia Agrícola, DEA/UFV, Viçosa-MG. Fone: (31) 99563-4101. e-mail: izabelle-sousa@hotmail.com

⁴ Professor Adjunto, DEA/UFV, Viçosa-MG. e-mail: andrerosa@ufv.br

Apresentado no
L Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2021
08 a 10 de novembro de 2021 - Congresso On-line

RESUMO: A suinocultura movimenta a economia brasileira de maneira significativa, entretanto, é uma atividade de elevado potencial poluidor. Dentre os métodos de tratamento dos efluentes produzidos destaca-se a digestão anaeróbia, uma vez que além de tratar o resíduo, ainda proporciona a geração do biogás, um subproduto de alto valor agregado, por ser uma fonte renovável de energia. A digestão anaeróbia é influenciada pelas condições climáticas locais, de modo que variações de temperatura podem interferir na eficiência do tratamento. O objetivo deste estudo foi avaliar a potencialização da produção de biogás em biodigestores lagoa coberta por meio do aquecimento de dejetos suínos a partir da recuperação de energia solar. A área de estudo foi uma suinocultura em Teixeira-MG. O sistema foi desenvolvido por meio de modelagem e simulação utilizando o software Energy-Plus. O estudo demonstrou que a instalação de 7 painéis solares promoveria a elevação da temperatura do efluente de 23 para 30 °C, produzindo 782 m³d⁻¹ de biogás, um aumento de 52,1 m³ d⁻¹ em relação ao cenário sem aquecimento. Conclui-se que o emprego da energia solar é uma alternativa relevante para otimizar a produção de biogás.

PALAVRAS-CHAVE: aquecimento de efluentes, energia solar, suinocultura

SOLAR ENERGY AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF HEATING OF COVERED LAGOON BIODIGESTERS FOR BIOGAS PRODUCTION

ABSTRACT: Pig farming moves the Brazilian economy significantly, however, it is a highly polluting activity. Among the methods of treatment of effluents produced stands out anaerobic digestion, which in addition to treating the manure, still provides the generation of biogas, a by-product of high added value, because it is a renewable source of energy. Anaerobic digestion is influenced by local climatic conditions, so temperature variations can interfere with treatment efficiency. The aim of this study was to evaluate the increase in biogas production in covered lagoon biodigesters through the heating of swine waste using solar energy as a heating source. The study area was a pig farming in Teixeira-MG. The system was developed through modeling and simulation at the Energy-Plus software. The study showed that the installation of 7 solar panels would promote an increase in effluent temperature from 23 to 30°C, producing

782 m³ d⁻¹ of biogas, 48 m³d⁻¹ more than the unheated scenario. It is concluded that the use of solar energy is a relevant alternative to optimize biogas production.

KEYWORDS: effluent heating, solar energy, pig farming

INTRODUÇÃO

A suinocultura é uma das principais atividades econômicas do Brasil, uma vez que a carne suína é uma importante fonte de proteína animal (AMARAL et al., 2019). A suinocultura brasileira apresentou, no ano de 2020, um aumento de 11,4% na produção nacional em relação ao ano anterior de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Em adição, segundo a Associação Brasileira dos Criadores de Suínos (ABCS) o Brasil se consolidou como 4º maior produtor mundial em 2019, com uma produção da ordem de 4,117 milhões de toneladas. No entanto, a atividade suinícola apresenta alto potencial poluidor (COSTA; MARVULLI, 2020) devido à grande quantidade de resíduos produzidos pelos animais, assim como sua elevada carga orgânica.

O manejo inadequado dos dejetos gera grande impacto ambiental negativo ao meio ambiente, tal como a contaminação de cursos d'água, presença de microrganismos causadores de doenças, além da degradação da qualidade ambiental (LIMA et al., 2020) sendo evidente a busca por alternativas para a gestão dos resíduos (AMARAL et al., 2019).

Dentre as alternativas de tratamento destaca-se a digestão anaeróbia, a qual consiste na decomposição de matéria orgânica pela ação de microrganismos na ausência de oxigênio. A digestão anaeróbia tem sido amplamente empregada para o tratamento dos dejetos suínos no Brasil em especial por meio de biodigestores lagoa coberta (BLCs), configuração que se destaca pelos menores custos de construção e operação (SILVA; TREVISAN, 2019). Em adição, os BLCs são construídos em trincheiras de formato trapezoidal invertido e impermeabilizados com geomembrana de PVC ou PEAD (ANDRADE, 2018); em sua cúpula o biogás produzido é armazenado.

Destacam-se os potenciais benefícios advindos da recuperação dos subprodutos em sistemas anaeróbios, seja pelo uso do biogás como fonte de energia (térmica e/ou elétrica) e o efluente tratado (digestato) como fertilizante. A eficiência na degradação da matéria orgânica nos BLCs é dependente de condições operacionais, em especial a temperatura, pH do meio, carga orgânica, tempo de retenção hidráulica e atividade microbiana (KUMAR et al., 2020), de modo que o comprometimento de alguns desses fatores pode ocasionar redução da produção de biogás e da eficiência do tratamento. De acordo com Deng et al. (2014), o funcionamento desses reatores possui grande influência das condições climáticas locais, de modo que reduzidas temperaturas em seu interior podem comprometer o processo de degradação da matéria orgânica. Estudos demonstram que o potencial de produção de metano em um biodigestor é dependente da temperatura e que suas flutuações afetam significativamente a produção do biogás (MAKAMURE; MUKUMBA; MAKAKA, 2021).

Chernicharo (2007) indica a faixa mesofílica (20 - 45 °C) como sendo a mais favorável para a degradação da matéria orgânica pela via anaeróbia. Souza et al. (2005) ao estudarem a otimização da produção de biogás através de dejetos suínos demonstraram que as temperaturas de 35 e 40°C favoreceram a partida dos biodigestores e resultaram em uma maior produção acumulada de biogás. Deng et al. (2016) utilizando biodigestores em escala laboratorial, encontraram o pico da produção de biogás do sistema com a temperatura de 35°C. Sousa et al. (2019) estudando uma granja de suínos na zona da mata mineira avaliaram que a temperatura do efluente em tratamento nos BLCs variou entre 20,6 e 26,6°C, de modo que independente da época do ano, o valor do efluente em degradação esteve abaixo da temperatura ótima para a

faixa mesofílica, da ordem de 30°C (YADVIKA et al., 2004). Preconiza-se que o aquecimento dos dejetos pode elevar a produção de biogás, assim como reduzir o TRH, eliminar patógenos e garantir a estabilidade da produção de gás durante o ano (MAKAMURE; MUKUMBA; MAKAKA, 2021). Sendo assim, alternativas têm sido propostas com o intuito de permitir o aquecimento do efluente em suinoculturas.

As fontes de energia mais favoráveis são aquelas que garantem estabilidade térmica e a redução de oscilações de temperatura ao longo do tratamento. A partir destas premissas, a energia solar destaca-se, devido aos altos índices de radiação solar no território brasileiro, além de favorecer a redução do consumo de combustíveis fósseis, potencializar a produção de biogás pela otimização operacional dos BLCs e ser uma fonte inesgotável de energia (KARIMOV; ABID, 2012). O objetivo deste estudo foi avaliar a potencialização da produção de biogás em biodigestores lagoa coberta por meio do aquecimento de dejetos suínos a partir da recuperação de energia solar.

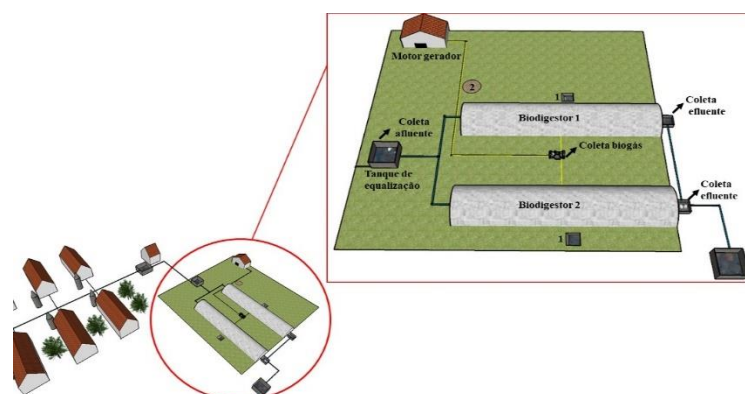
MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo

O estudo foi realizado em uma suinocultura localizada no município de Teixeira-MG, na zona da mata mineira. A granja funciona com o confinamento dos suínos em ciclo completo, indo do nascimento até a terminação. A unidade possui em média 10.819 animais. O sistema de tratamento de dejetos é composto por dois BLCs operando em paralelo, com vazão média de entrada de 102,3 m³.d⁻¹, volume útil unitário de 1.250 m³ e tempo de retenção hidráulica (TRH) estimado de 24,5 dias.

O biogás produzido alimenta um motogerador modelo GMWM120 para produção de eletricidade utilizada em benefício da granja. O monitoramento do sistema foi realizado em termos de temperatura da biomassa residente (interior do BLC) e caracterização do efluente para o período de set./2018 a ago./2019. Os dados de temperatura foram obtidos continuamente a cada 30 segundos por meio de sensores instalados na granja e transferidos para um *data logger*.

Em adição, amostras de efluentes foram coletadas semanalmente na entrada e saída dos biodigestores e analisadas em termos de SV e DQO conforme metodologia indicada na APHA (2017). A determinação da composição do biogás em termos de metano foi realizada a partir de coletas semanais de biogás, com análises realizadas em um analisador de gás (Analisador de Gás Infravermelho Online, modelo Gasboard, nº 3100). A Figura 1 apresenta o sistema de tratamento de resíduos da granja, bem como a localização dos sensores de temperatura da biomassa residente (1), do solo (2) e dos pontos de coleta.



Sensores de temperatura: 1- biomassa residente; 2- Solo

FIGURA 1. Croqui do sistema de tratamento dos efluentes da suinocultura

Sistema de aquecimento

A Figura 2 apresenta o sistema de aquecimento proposto para o efluente da suinocultura a partir da energia solar. O sistema é composto por uma caixa d'água para armazenamento da água a ser aquecida (1) e painéis solares (2) que recebem a água fria e promovem o seu aquecimento por meio da energia solar. O fluido após aquecido é bombeado até o painel radiante (3), no interior de um tanque de equalização (4). O efluente de entrada aquecido é direcionado para o biodigestor (5), a fim de avaliar as consequências do aumento da temperatura na otimização da produção de biogás.

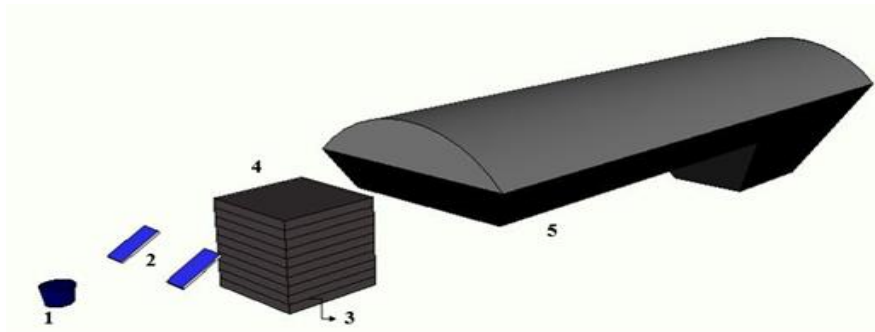


FIGURA 2. Fluxograma do sistema de aquecimento conectado ao biodigestor.

O sistema de aquecimento opera a partir da fonte de calor (energia solar), que promove o aquecimento da água. Em seguida, a água flui por um cano e é bombeada até o painel radiante, onde ocorre a troca de calor com o efluente no interior do tanque de equalização. Após a troca de calor, a água fria retorna para a fonte de calor para reiniciar o processo. A Figura 3 apresenta o esquema das conexões empregadas no modelo. As linhas vermelhas representam os canos que transportam a água quente e as linhas azuis representam os canos que transportam a água fria. Os pontos representam as conexões ou nós de ligação entre os componentes do sistema.

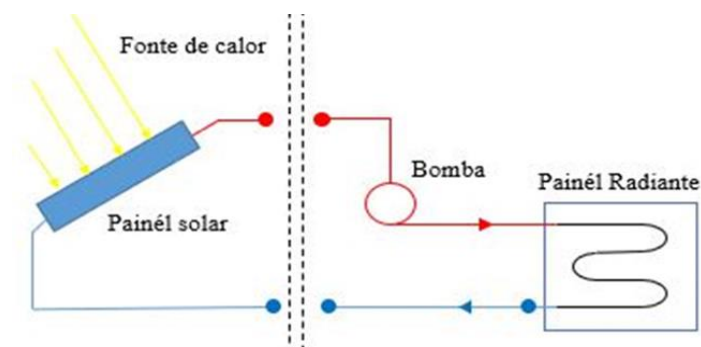


FIGURA 3. Diagrama do ciclo de operação do sistema de aquecimento

A modelagem matemática foi utilizada para simular o sistema de aquecimento e obter a quantidade de painéis solares (n) para atingir a temperatura de 30°C , correspondendo a faixa mesofílica da digestão anaeróbia, na qual os microrganismos são mais ativos, culminando na otimização do processo de tratamento e produção de biogás (YADVIKA et al., 2004).

O desenho do sistema de aquecimento e do biodigestor foi desenvolvido no software *SketchUp* (versão 17.2). A modelagem e simulação foram realizadas usando o software *Energy-Plus* (versão 8.7) e o *plugin Legacy Open Studio*. Considerou-se o solo saturado ao redor do biodigestor, por representar um cenário crítico para a manutenção da temperatura da biomassa no interior do biodigestor (VAZ, 2019). Os dados climatológicos requeridos para simular o sistema de aquecimento foram extraídos dos Dados Climatológicos de Viçosa (Minas Gerais - Brasil), uma vez que a estação meteorológica fica próxima da área rural de Teixeira,

representando o clima da região. O arquivo climático compatível com a extensão do programa de simulação foi obtido da página do Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética (Latecae) do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa (LATECAE, 2020). A localização da área de estudo foi obtida através das coordenadas geográficas do local. A temperatura do solo na simulação foi obtida através do sensor; as propriedades físicas e térmicas dos materiais que compõem o sistema, assim como informações dos painéis solares e do painel radiante foram obtidos a partir de literatura e do período de execução da simulação.

A produção de metano advinda dos BLCs na condição atual (sem aquecimento) e proposta (com aquecimento) foi estimada a partir do modelo matemático de Chen-Hashimoto (1983), sendo este o modelo mais indicado para a estimativa da produção de biogás em BLCs (OLIVEIRA, 2006 e LOPES et al., 2021). O modelo matemático para a predição da produção de metano é apresentado nas Equações 1 - 4.

$$B = B_0 \times [1 - (K \div (\mu_m \times TRH - 1 + K))] \quad (1)$$

$$K = 0,6 + 0,0006e^{(0,1185 \times SV)} \quad (2)$$

$$\mu_m = 0,013 T - 0,129 \quad (3)$$

$$Q_{CH4} = B \times Q_{afl} \times SV \quad (4)$$

em que,

B = produção de metano, $m^3 CH_4 kg^{-1} SV$;

B_0 = rendimento final do metano, $0,36 m^3 CH_4 kg^{-1} SV$;

K = constante cinética;

μ_m = crescimento específico máximo de microrganismos, d^{-1} ;

T = temperatura da biomassa residente, $^{\circ}C$;

TRH = tempo de retenção hidráulica, dias;

SV = teor de sólidos voláteis no efluente de entrada, $kg SV m^{-3}$;

Q_{afl} = vazão de entrada dejetos, $m^3 d^{-1}$ e

Q_{CH4} = produção de metano, $m^3 CH_4 d^{-1}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Monitoramento operacional dos biodigestores lagoa coberta

A Figura 4 apresenta os resultados do monitoramento para o período de estudo em termos de SV no efluente de entrada, DQO na entrada e saída do sistema e temperatura da biomassa residente.

O valor médio de SV no efluente de entrada para o período monitorado foi de $15,4 g.L^{-1}$, valor abaixo que o valor reportado por Chen (1983) - $31,5 g.L^{-1}$. Os valores médios de DQO na entrada e saída dos BLCs foram de $29,1 g.L^{-1}$ e $21,4 g.L^{-1}$, respectivamente, indicando uma eficiência média de remoção de 26,5%. A eficiência de degradação de DQO esteve abaixo da reportada na literatura para BLCs - 43 a 90% (VIVIAN et al., 2010; STIVAL et al., 2017). Para o período monitorado a temperatura da biomassa residente variou de $21,0$ a $26,7^{\circ}C$ (Figura 4), estando abaixo da temperatura ótima para o processo anaeróbio mesofílico, o que sugere que o emprego de fontes de energia poderiam ser uma alternativa para o incremento da temperatura, assim como no incremento da eficiência de degradação da matéria orgânica.

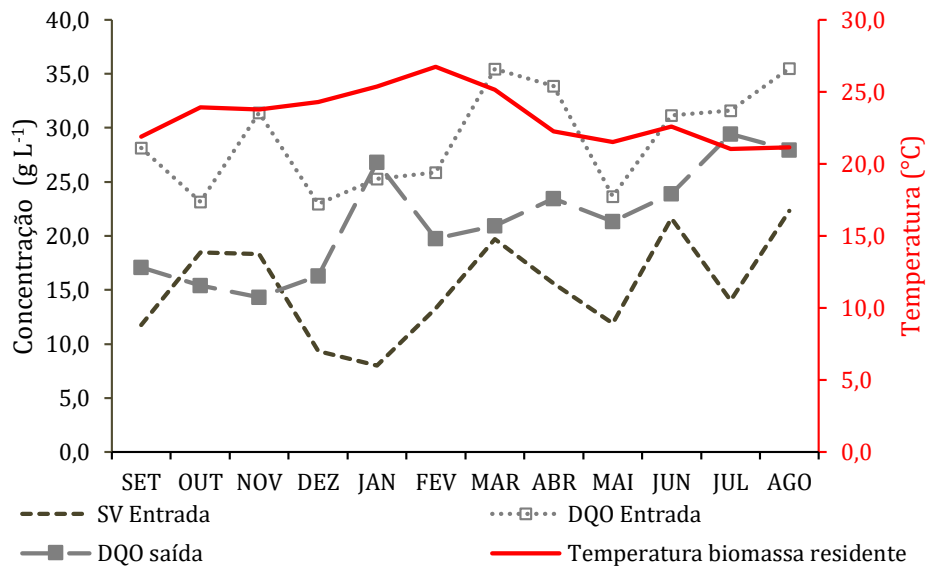


FIGURA 4. Resultados do monitoramento de SV, DQO na entrada e saída do sistema e temperatura da biomassa residente

A Figura 5 apresenta os dados de produção de biogás e de metano para o cenário atual. A produção média de biogás sem o sistema de aquecimento foi da ordem de 730,3 m³.d⁻¹. Em termos de produção volumétrica de biogás por animal, os valores obtidos variaram de 0,03 a 0,10 m³biogás.animal⁻¹.d⁻¹. De forma geral, a produção unitária de biogás por animal foi menor que a indicada por Silva et al. (2018) - 0,10 m³biogás.animal⁻¹.d⁻¹, o que reforça o interessante na busca de alternativas para potencializar a produção de biogás, o que se propõe via aquecimento do efluente pela energia solar.

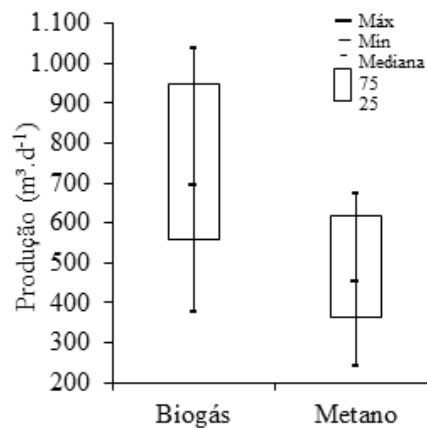


FIGURA 5. Produção de biogás e de metano para a granja monitorada - cenário atual (sem aquecimento).

Para o período monitorado a taxa de conversão de matéria orgânica degradada na forma de biogás variou de 0,5 a 3,0 m³biogás.kgDQO_{removida}⁻¹, em consonância com a reportada por Duda et al. (2015). Prado et al. (2010) ao avaliar a degradação de água residuária do café em reator UASB (escala laboratorial) com temperaturas variando de 22,5 a 26,4°C observaram valores médios de 0,58 m³biogás.kgDQO_{removida}⁻¹.

Proposta de aquecimento do efluente através da energia solar

A Figura 5 apresenta a relação entre a temperatura da biomassa residente, produção de biogás e número de painéis solares. De acordo com os resultados, a proposta de aquecimento do efluente pelo aproveitamento de energia solar poderia atingir a temperatura no efluente de 30°C pela instalação de 7 painéis solares, apontando um potencial de produção de biogás de 782,4 m³.d⁻¹, o que corresponde a um incremento de 7,1% na produção de biogás com esta alternativa de aquecimento para a temperatura ótima da faixa mesofílica.

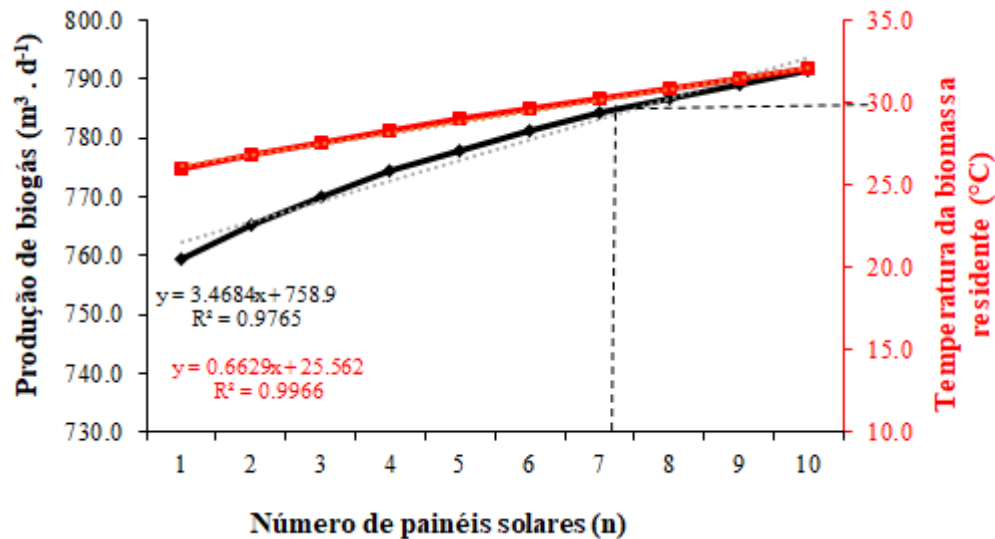


FIGURA 5. Relação entre a temperatura da biomassa residente, produção de biogás e número de painéis solares.

Observa-se que a instalação de sucessivos painéis solares incrementa a produção de metano/biogás, devido ao aumento da temperatura do efluente através do seu aquecimento via energia solar. No entanto, nota-se um aumento significativo até a instalação de 7 painéis, a partir disto, o ganho de temperatura e a produção de biogás mostram-se insignificantes em comparação ao elevado número de painéis que seriam necessários.

Os coeficientes de correlação (R^2) para o número de painéis *versus* produção de biogás e temperatura da biomassa residente foram elevados (0,9765 e 0,9966, respectivamente), o que destaca as relações de ajuste entre essas variáveis, ressaltando sua dependência e alto nível de correlação.

Estima-se que os 52,1 m³.d⁻¹ de biogás excedente gerado pela proposta futura de aquecimento seriam suficientes para produzir um adicional de 69 kWh.d⁻¹ no motogerador instalado na granja, considerando uma eficiência de conversão de 33%.

Dong e Lu (2013) utilizando energia solar para aumentar a eficiência da digestão anaeróbia em uma suinocultura na China obtiveram um incremento na produção de biogás de 11,2%, resultados convergentes com o presente estudo. O impacto na produção de biogás em biodigestores a partir do aquecimento pela energia solar também foi reportado por Axaopoulos e Panagakis (2003) na Grécia e Chen e Qim (2014) na China.

Em estudo realizado na Turquia foram abordadas as usinas de biogás aquecidas com energia solar, calculando-se a quantidade de biogás produzido anualmente com e sem sistema de aquecimento solar. Os resultados apontaram que o potencial de produção de biogás seria aumentado com a proposta de aquecimento do efluente (KOCAR; ERYASAR, 2007).

CONCLUSÕES

Diante do apresentado neste trabalho, conclui-se que a recuperação de energia solar é uma alternativa promissora para o aquecimento de efluentes de suinocultura. Nota-se que o incremento na temperatura do efluente a partir da recuperação de energia solar favorece o melhor desempenho da comunidade microbiana no interior do reator e, conseqüentemente, maior produção de biogás. O biogás é considerado uma fonte interessante de energia, além de aprimorar a sustentabilidade energética nas granjas devido à recuperação de recursos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG)- número do processo APQ-01109-18.

REFERÊNCIAS

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

ANDRADE, M. P. Eficiência de biodigestores canadenses no tratamento de dejetos de suínos em diferentes fases de produção. 2018. 48 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

AMARAL, A. C. do; CANDIDO, D.; STEINMETZ, R. L. R.; TÁPPARO, D. C.; KUNZ, A. Produção de biogás e energia elétrica com biodigestor de lagoa coberta e CSTR a partir de dejetos suíno. SIGERA. Florianópolis. p. 401-403, 2019.

AXAOPOULOS, P. PANAGAKIS, P. Energy and economic analysis of biogas heated livestock buildings. Biomass and Bioenergy, v. 24, p.239-248,2003.

COSTA, G. S. DA., MARVULLI, M. V. N. Soluções alternativas para o tratamento, disposição ou reutilização de dejetos animais provenientes de atividade suinícola no Brasil. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, 3(3), 1471–1479,2020.

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

CHEN, Z.; QIN, C. Experiments and simulation of a solar-assisted household biogas system. Energy Procedia, v. 61, p. 1760–1763, 2014.

CHERNICHARO, C.A.L. Reatores Anaeróbios. 2 ed. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5, 380 p. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

DONG, F; LU J. Using solar energy to enhance biogas production from livestock residue. A case study of the Tongren Biogas engineering pig farm in South China, Energy, 2013.

DENG, L., YANG, H., LIU, G., ZHENG, B., CHEN, Z., LIU, Y., PU, X., SONG, L., WANG, Z., LEI, Y. Kinetics of temperature effects and its significance to the heating strategy for anaerobic digestion of swine wastewater. Applied Energy 134.p 349-355.2014.

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

DUDA, R. M., DA SILVA VANTINI, J., MARTINS, L. S., DE MELLO VARANI, A., LEMOS, M. V. F., FERRO, M. I. T., DE OLIVEIRA, R. A. A balanced microbiota efficiently produces methane in a novel high-rate horizontal anaerobic reactor for the treatment of swine wastewater. *Bioresource Technology*, 197, 152–160, 2015.

KARIMOV, K.S.; ABID, M. Biogas digester with simple solar heater. *IIUM Engineering Journal*, Vol. 13, No. 2, 2012.

KOCAR, G., ERYASAR, A. An application of solar energy storage in the gas: Solar heated biogas plants. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29(16), 1513-1520, 2007.

KUMAR, V., KUMAR, P., KUMAR, P., SINGH, J. Anaerobic digestion of *Azolla pinnata* biomass grown in integrated industrial effluent for enhanced biogas production and COD reduction: Optimization and kinetics studies. *Environmental Technology and Innovation*, 17, 100627, 2020.

LIMA, J. D. O. DE, BONILLA, O. H., CÂMARA, C. P. Tratamento anaeróbico de dejetos orgânicos para remoção de poluentes e patógenos provindos de suinocultura na Universidade Estadual do Ceará. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 3(3), 1202–1211, 2020.

MAKAMURE, F.; MUKUMBA, P.; MAKAKA, G. An analysis of bio-digester substrate heating methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 137, n. August 2020, p. 110432, 2021.

MASSÉ, D. I.; MASSE, L. The effect of temperature on slaughterhouse wastewater treatment in anaerobic sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, v. 76, n. 2, p. 91–98, 2001.

OLIVEIRA, P. A. V. de; HIGARASHI, M.M. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006.

PRADO, M. A. C., CAMPOS, C. M. M., SILVA, J. F. D. Estudo da variação da concentração de metano no biogás produzido a partir das águas residuárias do café. *Ciência e Agrotecnologia*, 34, 475-484, 2010.

SÁNCHEZ, E., BORJA, R., WEILAND, P., TRAVIESO, L., MARTÍN, A. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. *Process Biochemistry*, 37(5), 483–489, 2001.

SILVA, F. P., DE SOUZA, S. N. M., KITAMURA, D. S., NOGUEIRA, C. E. C., OTTO, R. B. Energy efficiency of a micro-generation unit of electricity from biogas of swine manure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3900-3906, 2018.

STIVAL, L., ERRERA, M., AISSE, M. Avaliação do desempenho de uma unidade de biodigestão em escala real tratando dejetos da suinocultura. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 6(5), 983-994, 2017.

SILVA, A. C. G.; TREVISAN, G. M. Processo de produção e aproveitamento energético do biogás: uma revisão dos sistemas e tecnologias existentes no mercado. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.10, n.2, p.197-210, 2019.

VAZ, P. N. Simulação de biodigestor de fluxo tubular com e sem sistemas de recirculação e aquecimento. 116p.Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

VIVAN, M., KUNZ, A., STOLBERG, J., PERDOMO, C.,TECHIO, V. H. Eficiência da interação biodigestor e lagoas de estabilização na remoção de poluentes em dejetos de suínos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 320-325, 2010.

YADVIKA, S; SREEKRISHNAN, T. R; KOHLI, S; RANA, V. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresource Technology*, v.95, p,1-10, 200.