

PRISCILA DA SILVA MARADINI

**IMPLICAÇÕES DO AQUECIMENTO DE EFLUENTES DE SUINOCULTURA NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TERMODINÂMICA EM BIODIGESTORES
MODELO LAGOA COBERTA**

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

Orientador: André Pereira Rosa

Coorientadores: Alisson Carraro Borges
Joyce Correna Carlo

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

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

T

M298i
2021

Maradini, Priscila da Silva, 1994-

Implicações do aquecimento de efluentes de suinocultura na eficiência energética e termodinâmica em biodigestores modelo lagoa coberta / Priscila da Silva Maradini. – Viçosa, MG, 2021.
1 dissertação eletrônica (97 f.): il. (algumas color.).

Orientador: André Pereira Rosa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2021.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.069>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Efluentes. 2. Energy plus (Software). 3. Modelos matemáticos. 4. Biogás. 5. Meios de transferência de calor.
I. Rosa, André Pereira, 1983-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 628.35

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fátima
Alves CRB6/2578


PRISCILA DA SILVA MARADINI

**IMPLICAÇÕES DO AQUECIMENTO DE EFLUENTES DE SUINOCULTURA NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TERMODINÂMICA EM BIODIGESTORES
MODELO LAGOA COBERTA**

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

APROVADA: 08 de dezembro de 2021.

Assentimento:


Priscila da Silva Maradini
Autora



André Pereira Rosa
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, autor da vida, por ser meu guia e protetor e por ter me dado força, esperança e sabedoria para concluir mais uma etapa importante da minha vida.

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

Aos meus coorientadores, prof Dr. Alisson Carraro Borges e prof. Dr^a Joyce Correna Carlo, pelo conhecimento compartilhado.

À aluna de iniciação científica, Antonella, por toda ajuda com o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus estagiários, Philip e Tristan, pela rica experiência de troca cultural e troca de ideias.

Aos membros da banca pela disponibilidade e contribuições a fim de aprimorar este estudo.

Aos meus pais, Antonio e Carminha, e minhas irmãs, Aninha e Grazi, por serem exemplo, apoio e incentivo. Vocês são tudo para mim e sem vocês eu jamais teria chegado até aqui.

Ao meu companheiro e estagiário Allan, que dividiu comigo as alegrias e desesperos, por ter sido colo e ouvido nesses (longos) dois anos e “pouco” de mestrado e por toda ajuda com os desenhos e para decifrar a termodinâmica. Sua presença e amor foram fundamentais.

Às minhas colegas de quarto/república, Aninha e Isadora, pelo convívio, apoio e amizade e por compartilhar a vivência (nem sempre fácil) da vida acadêmica.

Ao meu filho de quatro patas, Maicão (*in memoriam*), por me ensinar tanto sobre paciência, calma e amor. Como eu te prometi, finalizamos mais esse ciclo. Obrigada por ter me adotado!

À mais nova integrante da família, Maya, que veio agitar meu mundo e meu coração.

À minha família de Viçosa e de Salto, que de longe ou de perto se fizeram presentes e sempre apoiaram meus sonhos.

Aos meus amigos de longa data ou mesmo os mais recentes, àqueles que não tenho mais muito (ou nenhum) contato, àqueles que conviveram comigo de forma presencial ou virtual nesses últimos dois anos, aos que foram e aos que ficaram, obrigada por terem feito parte de cada fase da

minha vida e por tudo que me ensinaram, tem um pedaço de cada um de vocês na minha história e no meu coração!

Aos membros do Laboratório de Qualidade Ambiental (LQA) por toda amizade, companheirismo e auxílio, mesmo que a distância.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade dessa rica experiência e aprendizado.

A financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – número do processo de concessão de bolsa: 132402/2019-0.

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

“A grandeza de uma nação pode ser julgada pelo modo que seus animais são tratados.”

Mahatma Gandhi

BIOGRAFIA

PRISCILA DA SILVA MARADINI é filha de Antonio Manoel Maradini Filho e Maria do Carmo da Silva Maradini, irmã de Ana Carolina Maradini e Grazielle da Silva Maradini. Nasceu em 16 de julho de 1994, na cidade de Itapetininga, São Paulo, Brasil.

Iniciou o curso de Engenharia Ambiental em março de 2012 na Universidade Federal de Viçosa, *campus* Viçosa – MG. Participou de Programas Institucionais de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), financiados pelo CNPq. Participou do Programa de Intercâmbio Ciência Sem Fronteiras, financiado pela CAPES, na Universidade de Montana (Estados Unidos). Concluiu a graduação em julho de 2018.

Em março de 2019, ingressou no programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em nível de mestrado, na área de Recursos Hídricos e Ambientais e subárea Qualidade Ambiental, Tratamento de Resíduos e Recuperação de Recursos. Submeteu-se à defesa em dezembro de 2021.

RESUMO

MARADINI, Priscila da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2021. **Influências do aquecimento de efluentes de suinocultura na eficiência energética e termodinâmica em biodigestores modelo lagoa coberta.** Orientador: André Pereira Rosa. Coorientadores: Alisson Carraro Borges e Joyce Correna Carlo.

Os biodigestores modelo lagoa coberta são amplamente utilizados no Brasil para o tratamento de efluentes agroindustriais devido ao baixo custo e à simplicidade de operação. Entretanto, em condições naturais, esses reatores operam em temperaturas abaixo do ideal, comprometendo a eficiência do sistema e a produção de biogás. Assim, o uso de fontes externas para aquecimento do efluente pode potencializar o funcionamento do biodigestor, com destaque para a energia solar, por ser esta proveniente de uma fonte de aquecimento perene. Neste trabalho teve-se como objetivo avaliar o uso de energia solar como fonte de aquecimento de efluentes de suinocultura em biodigestores modelo lagoa coberta e as implicações nas trocas térmicas, produção de metano e autossuficiência energética em granjas de suinocultura. O estudo foi realizado a partir de dados de uma estação de tratamento localizada em uma granja em Teixeira (Minas Gerais - Brasil). A modelagem matemática (programa *Energy plus*) foi utilizada como ferramenta para simular o sistema de aquecimento e o biodigestor, a fim de obter a nova temperatura de operação do sistema e comparar as trocas térmicas que ocorrem nos ambientes interno e externo ao biodigestor com efluente aquecido e com efluente sem aquecimento. O aquecimento de efluentes decorrente da recuperação de energia solar se apresentou como uma alternativa para potencializar a produção de metano, principalmente para o período frio devido à maior amplitude térmica. O aumento do número de painéis solares não implicou em contribuições mais expressivas na produção de metano e energia, uma vez que quando o sistema atingiu a temperatura de 30°C, 68,9% e 78,6% da demanda energética da granja pode ser suprida, nos respectivos períodos quente e frio, representando o melhor custo-benefício para o aumento da sustentabilidade energética da suinocultura. A temperatura de 30° C foi alcançada com o cálculo de 3 e 13 painéis solares nos períodos quente e frio, respectivamente. Os resultados obtidos no estudo das trocas térmicas atestaram que a radiação solar é a fonte primária de aquecimento dos reatores anaeróbios e que a elevada inércia térmica do solo contribui com a pequena variação da temperatura da biomassa ao longo do dia, mesmo no

cenário com o efluente aquecido. As trocas térmicas que ocorrem entre o ambiente externo e o biogás e entre o biogás e a biomassa apresentaram as mesmas relações e valores para os cenários sem e com aquecimento, com diferenças apenas entre os períodos quente e frio. No cenário com aquecimento, mesmo após as trocas térmicas com o biogás e com o solo, a temperatura da biomassa é capaz de atingir e estabilizar em 30°C, em ambos os períodos quente e frio. Os resultados desse trabalho são de grande relevância para otimizar a operação de biodigestores modelo lagoa coberta e o fluxo de energia dentro e fora dos reatores e, assim, contribuir para uma maior sustentabilidade energética dos sistemas agroindustriais de tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Aquecimento de efluentes. Energy plus. Meios de transferência de calor. Modelagem matemática. Produção de biogás.

ABSTRACT

MARADINI, Priscila da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2021. **Influences of heating pig effluents on energy efficiency and thermodynamics in covered lagoon biodigesters.** Adviser: André Pereira Rosa. Co-advisers: Alisson Carraro Borges and Joyce Correna Carlo.

Covered lagoon biodigesters are widely used in Brazil to treat agro-industrial effluents due the low cost and simple operation. However, under natural conditions, biodigesters operate at suboptimal temperatures, compromising the system efficiency and the biogas production. Thus, the use of external sources to heat the effluent can enhance the reactor operation, highlighting solar energy, as it comes from a perennial heating source. This work aimed to evaluate the use of solar energy as a heating source for pig effluents in covered lagoon biodigesters and the implications for thermal exchanges, methane production and energy self-sufficiency in pig farms. The study was carried out using data from a treatment plant located on a farm in Teixeiras (Minas Gerais - Brazil). Mathematical modeling (Energy plus program) was used as a tool to simulate the heating system and the biodigester, in order to obtain the new operating temperature of the system and compare the thermal exchanges that occur in the internal and external environments of the biodigester with heated and unheated effluent. The effluent heating through solar energy recovery presented as an alternative to potentialize the production of methane, mainly for the cold period due to the greater thermal amplitude. The increase of the number of solar panels did not necessarily imply in more significant contributions to the methane and energy production, once when the system reached a temperature of 30°C, 68.9% and 78.6% of the farm's energy demand could be supplied, in the respective hot and cold periods, representing the best cost-benefit to improve the pig farm energy sustainability. The temperature of 30°C was reached with the calculation of 3 and 13 solar panels in the hot and cold periods, respectively. The results obtained in the study of thermal exchanges certificated that solar radiation is the primary source of heating in anaerobic reactors and that the high thermal inertia of the soil contributes to the small variation in biomass temperature throughout the day, even in the scenario with the heated effluent. The thermal exchanges that occur between the external environment and the biogas and between the biogas and the biomass presented the same relationships and values for the scenarios without and with heating, with differences only

between the hot and cold periods. In the heating scenario, even after thermal exchanges with the biogas and the soil, the biomass temperature was able to reach and stabilize at 30°C, in both hot and cold periods. The results of this work are of great relevance to optimize the operation of covered lagoon biodigesters and the flow of energy inside and outside the reactors and, thus, contribute to greater energy sustainability of agro-industrial effluent treatment systems.

Keywords: Effluent heating. Energy plus. Heat transfer. Modeling. Biogas production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Fluxograma da metodologia empregada nesse estudo	27
Figura 2.2 – Localização da área de estudo	28
Figura 2.3 – Detalhamento das dimensões externa e interna dos biodigestores.....	29
Figura 2.4 – Representação da estação de tratamento dos efluentes da suinocultura com a indicação da localização dos sensores de temperaturas monitoradas	30
Figura 2.5 – Fluxograma do sistema de aquecimento conectado ao biodigestor	32
Figura 2.6 – Diagrama do ciclo de operação do sistema de aquecimento	32
Figura 2.7 – Interface do programa <i>Energy Plus</i>	33
Figura 2.8 – Representação do domínio do solo ao redor do tanque de equalização	39
Figura 2.9 – Representação das temperaturas média do ambiente (a), solo (b), biomassa residente (c) e efluente (d) monitoradas durante o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2019	45
Figura 2.10 – Variação das temperaturas da biomassa residente (azul) e do efluente (vermelho) monitoradas ao longo de dois anos.....	47
Figura 2.11 – Relação das temperaturas da biomassa residente e do efluente considerando os dois anos de monitoramento	48
Figura 2.12 – Variação das temperaturas do ambiente, da biomassa residente e do solo, a partir de médias horárias, para dados simulados e monitorados nos períodos quente (a) e frio (b) ..	52
Figura 2.13 – Relação entre a temperatura do efluente, produção teórica de metano e número de painéis solares para os períodos quente (a) e frio (b)	55
Figura 2.14 – Variação das temperaturas, a partir de médias horárias, considerando a temperatura inicial, 30° C e 35° C para os períodos quente (a) e frio (b)	58
Figura 2.15 – Relação entre produção teórica de metano, eletricidade produzida e número de painéis solares para os períodos quente (a) e frio (b)	63
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia empregada nesse estudo	73
Figura 3.2 – Representação do domínio do solo ao redor do biodigestor	77
Figura 3.3 – Representação das trocas térmicas entre o biodigestor, o meio ambiente externo e o solo.....	80

Figura 3.4 – Variação das temperaturas do ambiente e do biogás e fluxo de calor (q_1), a partir de médias horárias, para os períodos quente (a) e frio (b) no cenário sem aquecimento e períodos quente (c) e frio (d) no cenário com aquecimento 85

Figura 3.5 – Variação das temperaturas da biomassa e do solo e fluxos de calor (q_2 e q_3), a partir de médias horárias, para os períodos quente (a) e frio (b) no cenário sem aquecimento e períodos quente (c) e frio (d) no cenário com aquecimento 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características e propriedades físicas e térmicas dos materiais do sistema de aquecimento.....	36
Tabela 2.2 – Características e propriedades físicas e térmicas dos componentes internos e externos ao tanque de equalização.....	37
Tabela 2.3 – Valores de sólidos voláteis totais (SVT), vazão (Q) e tempo de retenção hidráulica (TRH) obtidos pelo monitoramento dos biodigestores no período de estudo	49
Tabela 2.4 – Indicadores de desempenho para diferentes perfis de temperatura considerando os cenários quente e frio.....	50
Tabela 2.5 – Detalhamento da energia fornecida para a granja por meio da conversão do metano em eletricidade.....	60
Tabela 3.1 – Características e propriedades físicas e térmicas dos materiais construtivos do biodigestor	75
Tabela 3.2 – Trocas térmicas entre as unidades componentes dos meios externos e internos ao biodigestor	80
Tabela 3.3 – Indicadores de desempenho para diferentes perfis de temperatura considerando os períodos quente e frio	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
A_m	Área da Superfície da Manta
A_u	Área Útil Ocupada pela Biomassa
B	Produção Relativa de Metano
B_0	Rendimento Final do Metano
BLC	Biodigestor Modelo Lagoa Coberta
CO_2	Dióxido de Carbono
d	Número de Dias da Simulação
E	Energia Elétrica Disponível
e	Espessura da Biomassa
EPS	Poliestireno Expandido
H_2	Gás Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMA	Instituto Mineiro de Agropecuária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
k	Constante Cinética
LATECAE	Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética
MG	Minas Gerais
n	Número de Valores Analisados
NH_3	Amônia
P_c	Poder Calorífico do Metano
PE	Potência Elétrica Total do Metano
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEX	Polietileno Reticulado Monocamada
PIB	Produto Interno Bruto
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVC	Policloreto de Vinila
Q	Vazão Afluente
Q_{CH_4}	Produção Total de Metano
q_t	Taxa de Calor por Radiação

$q_{tmédia}$	Taxa Média de Transferência de Calor
q_i	Radiação Solar Horária
$q_{1, 2, 3}$	Fluxos de Calor
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
REQMR	Raiz do Erro Quadrático Médio Relativo
R^2	Coefficiente de Determinação
r	Coefficiente de Correlação
SVT	Sólidos Voláteis Totais
TARP	Programa de Pesquisa em Análises Térmica
T	Temperatura da Biomassa
t_d	Tempo Diário de Operação do Motogerador
t_i	Tempo de Insolação
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UFV	Universidade Federal de Viçosa
V_B	Volume do Biodigestor
V_T	Volume do Tanque
$W \cdot m^{-2}$	Watt por m^2
μ_m	Crescimento Específico Máximo dos Microrganismos
η_c	Eficiência de Conversão do Combustível
η_g	Rendimento do Alternador
η_r	Rendimento do Motogerador
X	Valor Observado
\bar{X}	Média dos Valores Observados
Y	Valor Obtido pela Simulação

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.1 INTRODUÇÃO.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo geral.....	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
REFERÊNCIAS	21
CAPÍTULO 2: APRIMORAMENTO DA OPERAÇÃO DE BIODIGESTORES MODELO LAGOA COBERTA POR MEIO DA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR	23
2.1 INTRODUÇÃO.....	23
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
2.2.1 Caracterização do local de estudo	27
2.2.2 Monitoramento do sistema de tratamento dos efluentes	29
2.2.3 Sistema de aquecimento por energia solar	31
2.2.4 Modelagem Matemática.....	33
2.2.4.1 Dados climatológicos e localização.....	34
2.2.4.2 Dados de temperatura do solo.....	34
2.2.4.3 Propriedades dos materiais que compõem o sistema.....	35
2.2.4.4 Modelo dos painéis solares e painel radiante.....	39
2.2.4.5 Período de execução da simulação	40
2.2.5 Validação da simulação.....	40
2.2.6 Estimativa da produção de metano e de energia	42
2.2.7 Autossuficiência energética da granja.....	43
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
2.3.1 Dados de monitoramento dos biodigestores.....	44
2.3.2 Validação da Simulação	50
2.3.3 Sistema de aquecimento por energia solar	54
2.3.4 Autossuficiência energética da granja.....	59
2.4 CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	65

CAPÍTULO 3: ESTUDO DAS TROCAS TÉRMICAS INTERNAS E EXTERNAS EM UM BIODIGESTOR MODELO LAGOA COBERTA COM EFLUENTE AQUECIDO.....	70
3.1 INTRODUÇÃO.....	70
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	72
3.2.1 Modelo do biodigestor	73
3.2.2 Balanço de energia	79
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
3.3.1 Validação da simulação.....	83
3.3.2 Balanço energético	84
3.4 CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS	92
CAPÍTULO 4: CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
4.1 CONCLUSÃO GERAL	95
4.2 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	97

CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

Segundo os dados mais recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) do ano de 2017, a agropecuária no Brasil, por motivos históricos, socioeconômicos e geográficos, mantém-se como uma atividade de relevância no cenário nacional, com aproximadamente 5,3% de participação no Produto Interno Bruto (PIB), bem como uma atuação expressiva no âmbito do comércio internacional (IBGE, 2017a). Dentre as principais atividades do setor agropecuário, a suinocultura se destaca com um número total de animais de 39.346.192 cabeças, atrás apenas da produção de aves (1.362.254.000 cabeças) e bovinos (172.719.164 cabeças) (IBGE, 2017b).

O Brasil se apresenta como o quarto maior produtor e exportador de carne suína no mundo, com produção de 4,2 milhões de toneladas e exportação de 1,2 milhões de toneladas em 2020 (EMBRAPA, 2020a). Além disso, o Brasil é o quinto maior consumidor mundial de carne suína (3,0 milhões de toneladas) (EMBRAPA, 2021a). No cenário nacional, a região Sul é responsável pela produção de 66,0% de carne suína (2,7 milhões de toneladas), seguida pela região Sudeste com 18,0% (742 mil toneladas) e pela região Centro-Oeste com 14,9% (616 mil toneladas) (EMBRAPA, 2020b). Na região Sudeste, o estado de Minas Gerais se destaca, sendo responsável por 12,2% da produção nacional (502 mil toneladas) (EMBRAPA, 2020c).

As suinoculturas são empreendimentos de elevado potencial poluidor, uma vez que geram resíduos com elevadas cargas de matéria orgânica, nutrientes (principalmente fósforo e nitrogênio), gases nocivos, patógenos, sólidos sedimentáveis, hormônios, medicamentos e metais pesados (CHENG *et al.*, 2020; MOFOKENG; ADELEKE; AIYEGORO, 2016). Soma-se a isso a crescente modificação do sistema de produção de animais, passando de um sistema extensivo para um modelo intensivo de confinamento. A criação intensiva é caracterizada pela concentração de uma quantidade expressiva de animais em um espaço reduzido, de modo a aumentar a eficiência do processo e reduzir os custos de produção, agravando, ainda mais, os riscos de contaminação e degradação ambiental (FERNANDES FILHO; SANTANA; GATTAMORTA, 2018).

Dentre os impactos mais comuns associados ao manejo inapropriado dos resíduos gerados na atividade suinícola estão a contaminação do solo, de corpos hídricos e do ambiente atmosférico (ITO; GUIMARÃES; AMARAL, 2016). Desse modo, é imprescindível que os

dejetos sejam devidamente tratados e seus parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, estejam compatíveis com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430 de maio de 2011 (BRASIL, 2011) para posterior disposição no ambiente, respeitando a capacidade de autodepuração dos corpos hídricos.

Segundo Saviotti *et al.* (2016), as tecnologias mais empregadas para o tratamento dos dejetos suínos são: composteira, cama sobreposta, separação das fases (decantadores e peneiras) e biodigestores. De acordo com estes autores, no Brasil, os biodigestores se destacam, uma vez que são projetados e construídos de acordo com o volume de resíduos produzidos diariamente nas granjas, independentemente do tamanho da propriedade (SAVIOTTI *et al.*, 2016). Os biodigestores modelo lagoa coberta (BLC) são amplamente empregados no meio rural por serem considerados de baixo nível tecnológico e de fácil construção e operação (KUNZ *et al.*, 2019). Além disso, o processo de digestão anaeróbia que ocorre no interior desses reatores permite o aproveitamento dos subprodutos do tratamento, a saber: o biofertilizante e o biogás.

O biofertilizante pode ser empregado como uma alternativa aos fertilizantes químicos, com o intuito de aumentar a fertilidade do solo e a produção agrícola dentro ou fora das granjas, contribuindo para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, desde que sejam respeitadas as demandas nutricionais e limitações de assimilação do sistema solo-planta (ITELIMA *et al.*, 2018). O biogás, por sua vez, pode ser recuperado de quatro formas: (i) produção de energia térmica, por meio da queima do gás em caldeiras ou fornos; (ii) geração de eletricidade por motogeradores; (iii) processamento do biogás na forma de metano para uso como combustível veicular; e (iv) injeção na linha de gás natural (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

Entretanto, o tratamento de efluentes por meio do uso de BLC ainda apresenta algumas limitações, principalmente no que tange a manutenção e ao monitoramento do processo anaeróbio que ocorre no interior dos biodigestores, ocasionando perda de eficiência do tratamento. Por, na maioria das vezes, se tratarem de câmaras fechadas e não possuírem sistemas de agitação e aquecimento, esses reatores operam em função das condições climáticas locais, implicando diretamente na capacidade de estabilização da matéria orgânica e na geração de biogás (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Em países de clima tropical, como o Brasil, os biodigestores anaeróbios não instrumentados raramente operam em temperaturas ótimas para a atividade metanogênica, da ordem de 30°C a 35°C. Preconiza-se que condições mesofílicas (temperaturas de 20 a 40°C) favorecem o aumento da taxa metabólica dos microrganismos atuantes na biodigestão, garantindo uma maior estabilidade do processo e uma menor sensibilidade para mudanças no ambiente (MAO *et al.*, 2015; NÁTHIA-NEVES *et al.*,

2018). Sendo assim, alternativas têm sido propostas com o intuito de permitir o aquecimento do efluente em suinoculturas a fim de otimizar a operação dos biodigestores.

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 índices elevados 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 BLC e ser uma fonte inesgotável de energia (KARIMOV e ABID, 2012).

Desse modo, neste trabalho propôs-se avaliar o aquecimento de efluentes de suinocultura a partir da recuperação da energia solar antes de serem direcionados para tratamento em um biodigestor modelo lagoa coberta em escala plena. O sistema de aquecimento visa aumentar a temperatura do efluente a fim de que atendam as condições mesofílicas ótimas no interior dos reatores e, como consequência, potencializem a produção de biogás nos BLC. Em adição, no presente estudo pretendeu-se avaliar as trocas térmicas do efluente aquecido com os demais componentes do biodigestor e o ambiente externo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o uso de energia solar como fonte de aquecimento de efluentes de suinocultura em biodigestores modelo lagoa coberta (BLC) e as implicações nas trocas térmicas nos BLC, na produção de metano e na autossuficiência energética em granjas de suinocultura.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Propor, por meio de modelagem matemática e simulação, um sistema de aquecimento de efluente de suinocultura a partir da energia solar, conectado a um biodigestor modelo lagoa coberta;
- ii. Estudar os impactos do aquecimento do efluente na produção de metano e geração de energia elétrica;
- iii. Obter a temperatura ideal de operação dos biodigestores modelo lagoa coberta para otimização do sistema em termos de eficiência energética;
- iv. Avaliar as trocas térmicas e taxas de transferência de calor entre o biodigestor com o efluente aquecido e o ambiente externo para diferentes condições climáticas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em quatro capítulos.

No presente capítulo é feita uma contextualização do tema abordado, ressaltando a relevância da pesquisa e os objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2 é apresentada uma proposta de sistema de aquecimento de efluente de suinocultura por meio da recuperação de energia solar, a fim de otimizar o tratamento do efluente em um biodigestor modelo lagoa coberta localizado no município de Teixeira, MG. Além disso, foi avaliada a potencialização da produção de biogás e a geração de energia elétrica.

No capítulo 3 é abordada a análise das trocas térmicas que ocorrem no ambiente interno e externo ao biodigestor modelo lagoa coberta após a implantação do sistema de aquecimento.

No capítulo 4 é descrita a conclusão geral do estudo e são sugeridos alguns tópicos para trabalhos futuros, com o intuito de incentivar o avanço desse estudo.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Resolução CONAMA n° 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 2011.

CHENG, D.; NGO, H. H.; GUO, W.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; LIU, Y.; WEI, Q.; WEI, D. A critical review on antibiotics and hormones in swine wastewater: water pollution problems and control approaches. **Journal of Hazardous Materials**. v. 387, p. 1-12, 2020.

EMBRAPA. **Embrapa suínos e aves: Estatísticas – mundo**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2020a. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas/suinos/mundo>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

_____. **Embrapa suínos e aves: Estatísticas – Brasil**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2020b. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas/suinos/brasil>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

_____. **Embrapa suínos e aves: Estatísticas**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2020c. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas>>. Acesso em: 10 ago. 2020.

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.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agro 2017**. Ranking – Todos do Brasil por efetivo do rebanho. Rio de Janeiro: IBGE, 2017a. Disponível em:

<https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/pecuaria.html?localidade=0&tema=0>. Acesso em: 10 ago. 2020.

_____. **Censos 2017**. Sistema de contas regionais: Brasil 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2017b. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/5f7d4c59d9e7845e07a15177c7f48946.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2020.

ITELIMA, J. U.; BANG, W. J.; SILA, M. D.; ONYIMBA, I. A.; EGBERE, O. J. A review: biofertilizer – a key player in enhancing soil fertility and crop productivity. **Microbiology Biotechnology Reports**, v. 2, n. 1, p. 22-28, 2018.

ITO, M.; GUIMARÃES, D.; AMARAL, G. Impactos ambientais da suinocultura: desafios e oportunidades. **Agroindústria – BNDES Setorial**, v. 44, p. 125-156, 2016.

KARIMOV, K.S.; ABID, M. Biogas digester with simple solar heater. **IJUM Engineering Journal**, v. 13, 2012.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera – Embrapa Suínos e Aves, 2019.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015.

MOFOKENG, D. S.; ADELEKE, R.; AIYEGORO, O. A. The analysis of physicochemical characteristics of pig farm seepage and its possible impact on the receiving natural environment. **African Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, n. 8, p. 242-252, 2016.

NASCIMENTO, L. A.; OLIVEIRA, R. R. M.; SOUSA, I. P.; MARADINI, P. S.; ROSA, A. P. Insights to improve covered lagoon biodigesters through by-products recovery in pig farms. **Environmental Research and Technology**, v. 4, p. 284-292, 2021.

NÁTHIA-NEVES, G.; BERNI, M.; DRAGONE, G.; MUSSATO, S. I.; FORSTER-CARNEIRO, T. Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 15, p. 2033-2046, 2018.

SAVIOTTI, B.; DIAS, C. P.; COSER, F.; LEITÃO, F.; de OLIVEIRA, P. A. V. **Suinocultura de baixa emissão de carbono**: levantamento de tecnologias de tratamento de dejetos para suinocultores de pequeno porte. 1. ed. Brasília: MAPA, 2016.

CAPÍTULO 2: APRIMORAMENTO DA OPERAÇÃO DE BIODIGESTORES MODELO LAGOA COBERTA POR MEIO DA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

2.1 INTRODUÇÃO

Os biodigestores são reatores anaeróbios utilizados para o tratamento de diferentes tipos de compostos orgânicos, como dejetos animais, resíduos domésticos e industriais. Os biodigestores modelo lagoa coberta (BLC) são amplamente empregados no Brasil para tratar efluentes agroindustriais, principalmente os efluentes gerados na atividade de suinocultura, uma vez que apresentam baixo custo e simplicidade operacional (CHENG e WEI, 2018). O estado de Minas Gerais é considerado um dos polos de suinocultura no país, com um total de 4.739 propriedades, segundo o levantamento realizado pelo Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA) em janeiro de 2019 (SOUSA, 2019). Dessas, em 295 propriedades faz-se o uso de BLC para o tratamento de efluentes, correspondendo a uma estimativa de 4.504,8 toneladas de dejetos (65,4% da geração diária), com uma produção de 271.968,4 m³ de biogás d⁻¹ (SOUSA, 2019). O biogás é gerado como um subproduto do processo anaeróbio que ocorre no interior dos BLC e pode ser convertido em energia elétrica ou térmica (KHALIL *et al.*, 2019).

Uma das maiores vantagens do emprego dos BLC é a conversão da biomassa em bioenergia por meio da recuperação do biogás, substituindo fontes de energia não-renováveis em alternativas mais sustentáveis (KUNDU *et al.*, 2017). Desse modo, a recuperação otimizada do biogás pode favorecer a sustentabilidade energética das granjas e contribuir com a diversificação da matriz energética do Brasil a partir da produção descentralizada de energia.

Entretanto, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), enquanto 8,6% da matriz energética brasileira é proveniente da energia da biomassa, apenas 0,08% é advinda da recuperação energética do biogás (ANEEL, 2020). O baixo aproveitamento do potencial energético do biogás está associado a diversos fatores, dentre os quais: (i) ausência de regulamentações específicas para esse fim; (ii) altos investimentos iniciais e baixos incentivos econômicos; (iii) limitações na manutenção das unidades em geral; (iv) necessidade de desenvolvimento de tecnologias que permitam a otimização do processo anaeróbio e da produção de biogás; e (v) carência de informações relativas ao processo anaeróbio dentro dos biodigestores (FERREIRA *et al.*, 2018; MARIANI, 2018).

O desenvolvimento do processo anaeróbio é dependente de alguns fatores operacionais, como temperatura, pH, tempo de retenção hidráulica, carregamento orgânico, teor de água, relação carbono/nitrogênio, além de parâmetros estruturais como os diferentes modelos de reatores (NÁTHIA-NEVES *et al.*, 2018). A temperatura no interior dos biodigestores é um dos principais fatores que determina a eficiência do tratamento e, conseqüentemente, a geração de biogás, uma vez que está diretamente relacionada à velocidade das reações da biodigestão e ao desenvolvimento dos microrganismos atuantes no processo anaeróbio (CHERNICHARO, 2008). A otimização do processo anaeróbio e a maior produção de biogás estão associadas a uma faixa de temperatura ótima de atividade microbiana (ANUKAM *et al.*, 2019).

Existem duas faixas ideais de temperatura da atividade microbiana nos processos anaeróbios: (i) condição mesofílica, com temperaturas variando entre 20 e 45°C, com temperatura ótima de 35°C; e (ii) condição termofílica, com temperaturas variando entre 50 e 65°C e temperatura ótima de 55°C (NÁTHIA-NEVES *et al.*, 2018). No Brasil, a temperatura média anual é de 23,5°C, com amplitude térmica de 21,2°C (INMET, 2020a). No estado de Minas Gerais (MG), a temperatura média anual é de 21,8°C, com amplitude térmica de 12,6°C (INMET, 2020b). Assim, a maioria dos BLC no Brasil opera em temperaturas próximas ao limite inferior da faixa mesofílica, uma vez que não possuem sistemas complementares de agitação e aquecimento, comprometendo o processo como um todo.

Em um estudo desenvolvido por Sousa (2019) referente ao monitoramento de dois biodigestores modelo lagoa coberta em uma suinocultura localizada no município de Teixeira (MG) concluiu-se que a eficiência do sistema de tratamento apresenta oscilações durante o ano, associadas ao manejo dos dejetos na granja e às variações da temperatura ao longo do ano nos biodigestores sem aquecimento. A autora identificou que o sistema operou sob condições de temperatura abaixo do ideal: 20,3°C no período frio e 26,2°C no período quente (SOUSA, 2019).

Diante desse cenário, novas alternativas têm sido propostas a fim de otimizar a operação de reatores anaeróbios em termos de eficiência do tratamento e de produção energética. Entre as principais alternativas pode-se citar o aquecimento do efluente usando fontes internas ou externas de calor. A maior parte das pesquisas relacionadas a essa temática se dão por meio de estudos de bancada (CAO *et al.*; 2020; CHAE *et al.*, 2008; DENG *et al.*, 2016) e modelagem matemática (GUNJO *et al.*, 2017; HASSANEIN *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2017; VAZ *et al.*, 2020) para diferentes configurações de reatores anaeróbios. No Brasil, há poucos sistemas de aquecimento de efluente em escala plena em biodigestores modelo lagoa coberta. Entretanto,

os estudos envolvendo modelagem matemática e simulação requerem um monitoramento em campo dos sistemas para calibração e validação, minimizando imprecisões e aproximando os resultados simulados dos valores reais (LIU *et al.*, 2017).

Deng *et al.* (2016) avaliaram a produção de biogás e o rendimento de metano em três valores de temperatura (15, 25 e 35°C) em um reator anaeróbio de escoamento ascendente. O estudo foi desenvolvido em escala laboratorial e as temperaturas foram controladas por meio da circulação de água quente em um sistema de banho-maria termostaticamente monitorado. Os autores observaram que o rendimento do metano a 35°C foi 10,1% superior ao obtido à 25°C, ao passo que o rendimento do metano a 25°C foi 25,2% maior do que a 15°C (DENG *et al.*, 2016).

Hassanein *et al.* (2015) realizaram um estudo para simular o efeito de um sistema de aquecimento de efluente de um biodigestor por meio do aproveitamento da energia solar. O objetivo do estudo foi avaliar a manutenção da temperatura e a otimização da produção de biogás. Os autores compararam dois tipos de sistemas: (i) biodigestor coberto por uma estufa externa e uma estufa interna a fim de permitir que o tubo de entrada recebesse calor adicional; e (ii) biodigestor sem fonte de aquecimento. A pesquisa revelou que o sistema sem aquecimento não atingiu a temperatura necessária para a produção contínua de biogás, o que foi possível no sistema com aquecimento, visto que o aumento da temperatura média mensal garantiu a produção de biogás o ano todo.

A recuperação da energia solar, por meio da instalação de painéis solares ou estufas, como fonte externa de aquecimento do efluente se apresenta como uma alternativa viável por ser sustentável e perene. Além disso, o Brasil possui potencial para utilização de energia solar, uma vez que a irradiação solar global média incidente sobre o território varia de 4,4 kWh m⁻² d⁻¹ a 5,5 kWh m⁻² d⁻¹ entre as regiões do país, com média de 5,2 kWh m⁻² d⁻¹ (PEREIRA *et al.*, 2017). No estado de Minas Gerais, a irradiação solar média é da ordem de 5,0 kWh m⁻² d⁻¹ (INMET, 2020b). De acordo com Schlecht e Meyer (2012), locais com disponibilidade de irradiação solar a partir de 5,0 kWh m⁻² d⁻¹ e baixa nebulosidade apresentam potencial para geração de energia elétrica heliotérmica. Entretanto, mesmo em regiões com menor incidência de radiação solar, é possível o aproveitamento do potencial solar térmico para outros usos, como o aquecimento da água para fins de uso doméstico, dessalinização da água, processos industriais, secagem de grãos, aquecimento de ambientes e desinfecção de produtos (PEREIRA *et al.*, 2017).

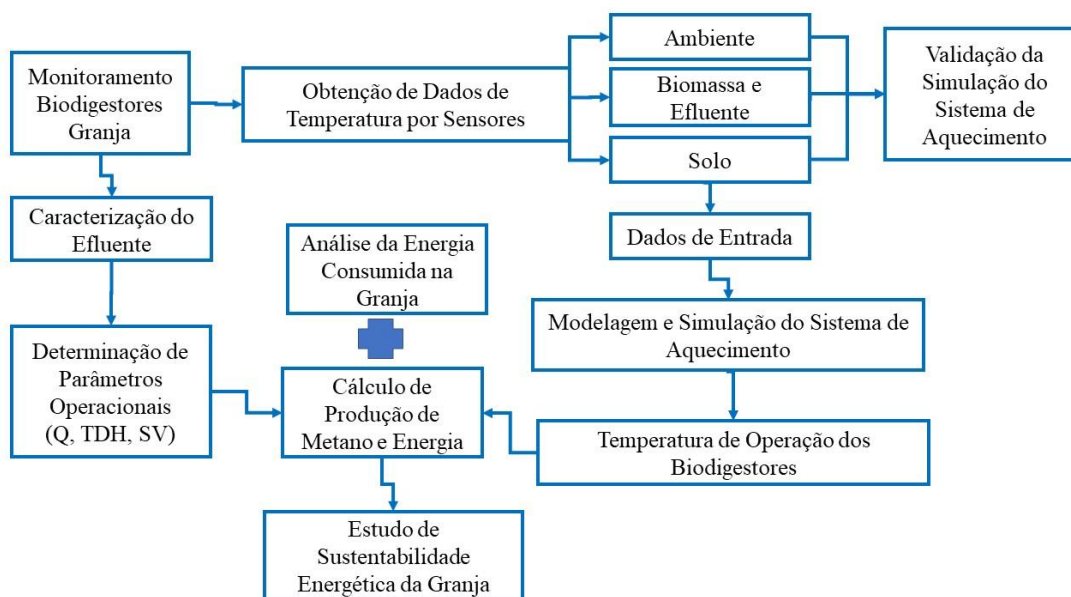
O emprego de modelos computacionais para modelagem e simulação de sistemas de aquecimento de efluente pode favorecer os estudos de viabilidade técnica e econômica e a posterior implantação em larga escala, reduzindo custos e obtendo resultados mais efetivos (MEISTER *et al.*, 2017). Desse modo, a aplicação de ferramentas computacionais nos estudos envolvendo a digestão anaeróbia possibilita uma avaliação mais detalhada de todas as variáveis que influenciam o tratamento e a geração dos subprodutos. Além disso, os resultados podem representar um incentivo à geração descentralizada de energia devido a otimização da eficiência do sistema e da produção de biogás.

Neste estudo teve-se como objetivo desenvolver, por meio de simulações, um sistema de aquecimento de efluente de suinocultura a partir da recuperação de energia solar conectado a um biodigestor modelo lagoa coberta, assim como avaliar o impacto do aquecimento na produção teórica de metano e autossuficiência energética na granja.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os procedimentos empregados no modelo do sistema de aquecimento, bem como as ferramentas necessárias para a obtenção dos dados de entrada. Primeiramente foi realizado um estudo do desempenho operacional do sistema de tratamento de dejetos de uma granja suinícola em termos de qualidade do tratamento e perfil de temperatura sem a implantação do sistema de aquecimento. Os resultados do monitoramento das temperaturas foram empregados como dados de entrada do modelo e validação da simulação do sistema de aquecimento. Em adição, as informações relativas à qualidade do efluente foram utilizadas com o intuito de obter a estimativa da produção de metano e energia, considerando os cenários com e sem sistema de aquecimento. Ainda, foi desenvolvido um estudo de autossuficiência energética da granja, considerando a otimização do tratamento e a produção de biogás. Na Figura 2.1 apresenta-se o fluxograma da metodologia empregada nesse capítulo.

Figura 2.1 – Fluxograma da metodologia empregada nesse estudo



Fonte: A autora

2.2.1 Caracterização do local de estudo

O estudo de aquecimento do efluente foi realizado utilizando dados provenientes de um sistema de tratamento localizado em uma suinocultura situada no município de Teixeiras, Minas Gerais, Brasil, na latitude $20^{\circ} 34' 07,2''$ S, longitude $42^{\circ} 52' 01,6''$ O e 678 m de altitude (Figura 2.2). A granja opera em sistema de ciclo completo de criação dos animais em confinamento, indo do nascimento até a terminação. A unidade possui 10.695 animais, sendo 1.631 matrizes e 14 varões.

Figura 2.2 – Localização da área de estudo



Fonte: Google Earth (2020)

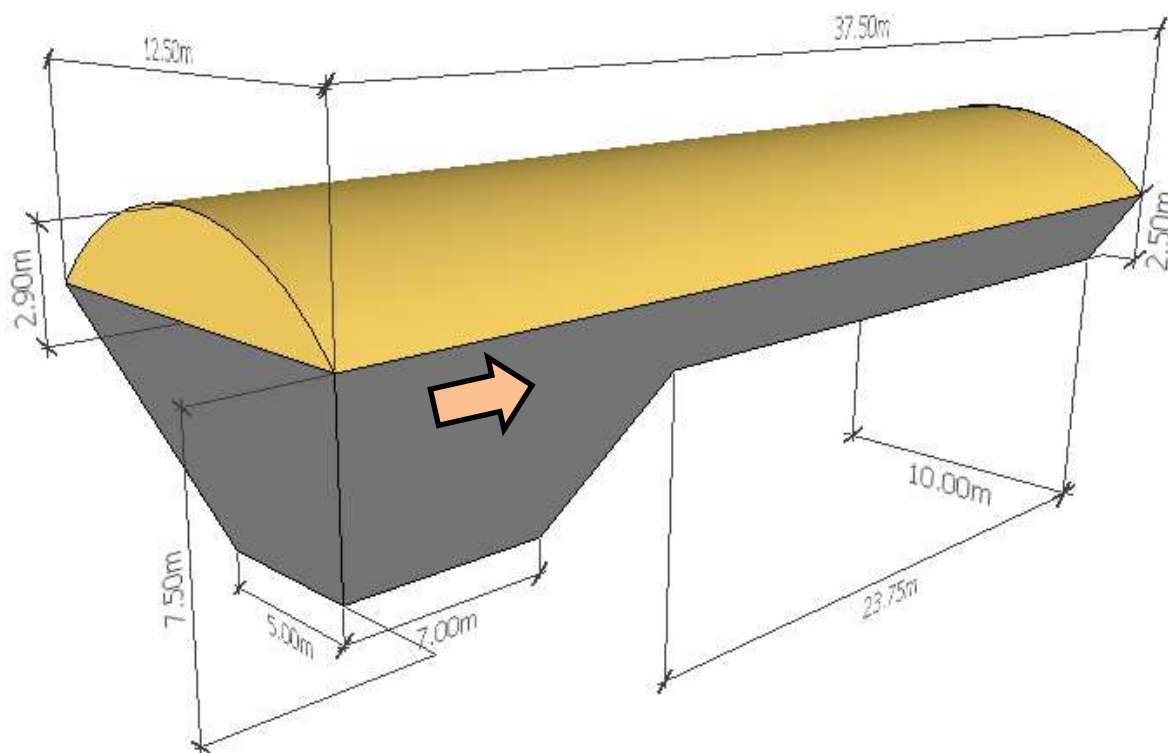
O sistema de tratamento dos efluentes é composto por um tanque de distribuição que recebe os dejetos por ação da gravidade e, com o auxílio de uma bomba, esses dejetos são direcionados de maneira semi-contínua para dois biodigestores modelo lagoa coberta operando em paralelo. Após o tratamento nos biodigestores, o efluente é encaminhado para uma lagoa de estabilização para polimento e uso como fertilizante orgânico em áreas de pastagens na propriedade.

Os biodigestores foram construídos em formato de tronco de pirâmide invertido revestida no fundo e nas paredes com geocomposto de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) flexível, com 1,25 mm de espessura, e cobertos com outra manta do mesmo material, formando a cúpula (reservatório do biogás), com 1,0 mm de espessura. A capacidade volumétrica (V_B) de cada biodigestor é de 1.250 m³. Na Figura 2.3 apresenta-se o detalhamento das principais dimensões dos biodigestores. A seta indica o fluxo do efluente no interior do reator.

O biogás produzido nos BLC é direcionado para uma coluna de adsorção, e posteriormente, convertido em energia elétrica por meio de um motogerador com 120 kVA de potência, modelo GMWM120. A energia produzida é injetada na rede de distribuição da

concessionária de energia e registrada em um medidor do padrão de energia, para posterior compensação de eletricidade da unidade produtora.

Figura 2.3 – Detalhamento das dimensões externa e interna dos biodigestores



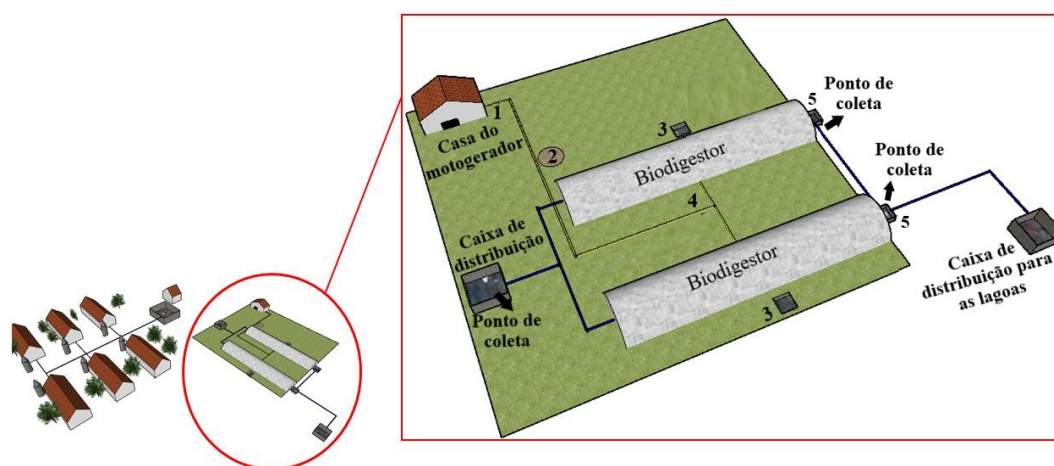
Fonte: A autora

2.2.2 Monitoramento do sistema de tratamento dos efluentes

A estação de tratamento de dejetos da granja é também monitorada em termos de temperatura por meio de sete sensores de termoresistência modelo PT100 3 fios, com design tipo PCA/S, classe B. O primeiro sensor se encontra em um ponto próximo à casa do motogerador e seu objetivo é monitorar a temperatura do ambiente externo. Já o segundo, está localizado próximo ao primeiro biodigestor e monitora a temperatura do solo, estando localizado a 1 m de profundidade do solo e coberto com uma proteção de PVC ao longo da extensão dos fios. Os terceiro e quarto sensores medem a temperatura da biomassa e se localizam nas caixas de passagem ao lado dos respectivos biodigestores. O quinto sensor está posicionado entre os dois biodigestores, a fim de mensurar a temperatura do biogás. Os últimos dois sensores (sexto e sétimo) se encontram nas caixas de saída dos biodigestores e medem a temperatura do efluente. Na Figura 2.4 apresenta-se o detalhamento das unidades de tratamento

de dejetos na granja, bem como os locais em que os sensores para a mensuração dos dados de temperatura e da produção de biogás foram instalados.

Figura 2.4 – Representação da estação de tratamento dos efluentes da suinocultura com a indicação da localização dos sensores de temperaturas monitoradas



Sensores de temperatura: 1- Ambiente, 2- Solo, 3- Biomassa, 4- Biogás, 5- Efluente

Fonte: SOUSA (2019)

Os sensores de temperatura foram conectados a um *Data Logger* Industrial Multicanais (*FieldLogger*) e por meio de roteadores presentes na granja, os dados foram transferidos por telemetria a uma central localizada no Centro de Conhecimento em Bioenergia, situado na Vila Gianetti da Universidade Federal de Viçosa, onde foram disponibilizados e armazenados em um sistema gerenciador de dados (MySQL) de forma contínua e em tempo real.

Os dados do monitoramento das temperaturas internas e externas aos biodigestores foram processados por uma interface desenvolvida em *python*, a fim de que fosse possível filtrá-los de acordo com a necessidade do trabalho. Nesse estudo, a configuração de filtro utilizada foi uma janela de tempo de quinze minutos, ou seja, as leituras da temperatura foram armazenadas a cada quinze minutos, sendo que o processo ocorreu vinte e quatro horas por dia.

O sistema em estudo já opera e é monitorado com o aparato indicado na Figura 2.4 desde janeiro de 2018. Neste trabalho, o banco de dados avaliado correspondeu ao período de janeiro de 2018 a dezembro de 2019 e foram consideradas as temperaturas médias mensais do ambiente, do solo, do efluente e da biomassa residente (massa líquida formada pela degradação da matéria orgânica no interior dos BLC).

Os dados foram organizados em médias diárias e mensais e analisados por meio de estatística descrita. Em seguida, gráficos tipo *box-plot* foram utilizados para indicar as variações médias de temperatura durante a operação dos biodigestores para o cenário base (ausência de sistema de aquecimento).

A vazão de entrada (Q) foi estimada com base no consumo mensal de água mensurado em hidrômetros instalados na granja no período de um ano (set. 2018 – ago. 2019), considerando um coeficiente de retorno de 0,65 de acordo com recomendação de Souza *et al.* (2016) para sistemas suínocolas de ciclo completo.

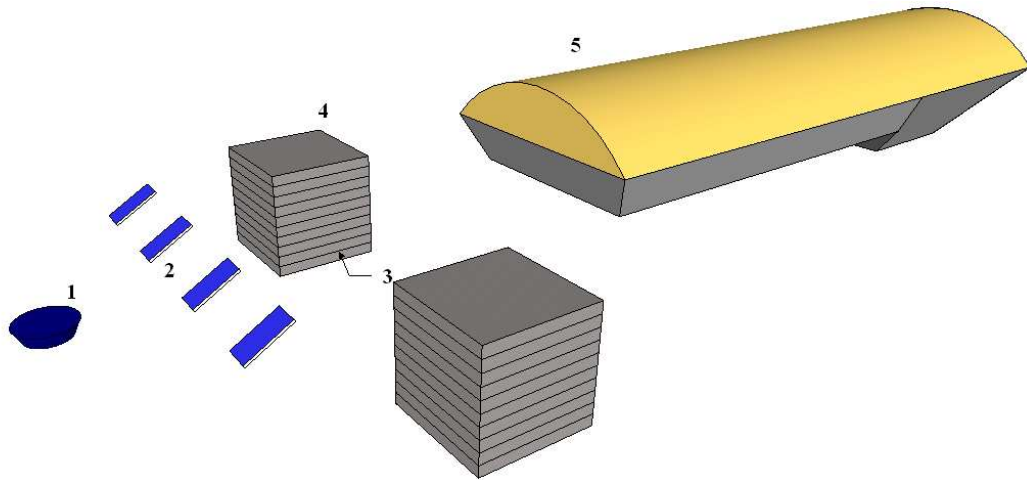
Em relação a qualidade do efluente, para esse estudo foram adotados os teores de sólidos voláteis totais (SVT) e tempo de retenção hidráulica (TRH), os quais foram obtidos no estudo de Lopes (2020). A coleta das amostras na entrada e saída dos dois BLC foi realizada semanalmente a partir de coletas simples durante todo o tempo de monitoramento (set. 2018 – ago. 2019). A metodologia analítica para as análises de SVT foram realizadas segundo o *Standard Methods* (APHA, 2017). O TRH dos biodigestores foi determinado a partir da vazão afluente e a capacidade volumétrica dos reatores.

2.2.3 Sistema de aquecimento por energia solar

Na Figura 2.5 apresenta-se o sistema de aquecimento proposto com suas unidades componentes, a saber: (i) um reservatório para armazenamento da água a ser aquecida; (ii) painéis solares ligados em paralelo que recebem a água fria e promovem o aquecimento dessa água; e (iii) um painel radiante com a água aquecida em seu interior e instalado ao redor do tanque de equalização.

Os tanques de equalização são responsáveis por mitigar o efeito de taxas de vazão variáveis e facilitar o projeto e a operação das unidades de tratamento. Nesse estudo, o tanque de equalização recebe o efluente da suinocultura e o armazena, a fim de aumentar o tempo de contato com a água quente. A proposta visa a implantação de dois tanques operando em batelada, de modo que enquanto uma unidade permanece com a biomassa sendo aquecida, a outra recebe o efluente. O efluente aquecido é direcionado para os biodigestores, a fim de que seja possível estudar as perdas de calor entre o reator e o meio que o circunda considerando a nova temperatura de operação do sistema (Capítulo 3).

Figura 2.5 – Fluxograma do sistema de aquecimento conectado ao biodigestor

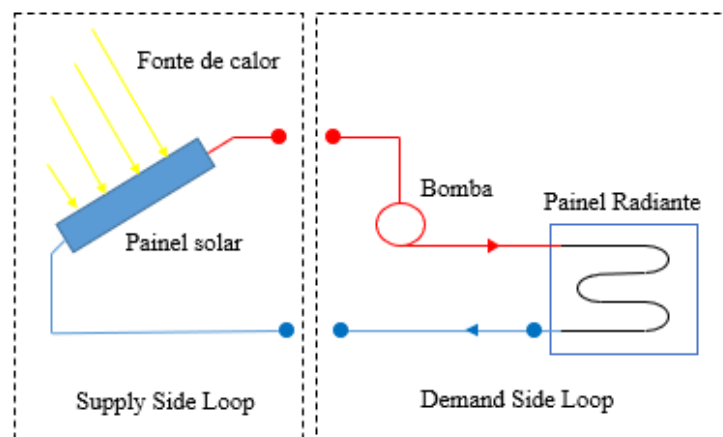


Componentes do sistema: 1 – Reservatório, 2 – Painéis solares, 3 – Painel radiante com água aquecida, 4 – Tanque de equalização, 5 – Biodigestor modelo lagoa coberta

Fonte: A autora

O sistema de aquecimento opera em ciclo fechado, de modo que a fonte de calor, nesse caso a energia solar, promova o aquecimento da água (*Supply Side Loop*). A água aquecida ao fluir por uma tubulação é bombeada até o painel radiante, onde ocorre a troca de calor com a biomassa no interior do tanque de equalização (*Demand Side Loop*). Após a troca de calor, a água fria retorna para a fonte de calor a fim de reiniciar o processo (*Supply Side Loop*). Na Figura 2.6 apresenta-se o esquema do sistema de aquecimento empregado no modelo. As linhas vermelhas representam as tubulações que transportam a água quente, enquanto as linhas de azuis representam as tubulações que transportam a água fria. Os pontos representam as conexões (nós de ligação) entre os componentes do sistema.

Figura 2.6 – Diagrama do ciclo de operação do sistema de aquecimento



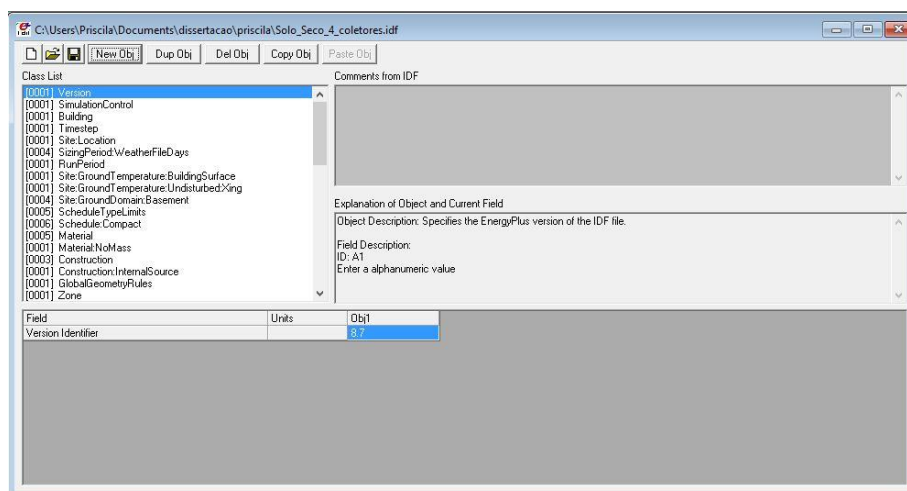
Fonte: A autora

2.2.4 Modelagem Matemática

A modelagem matemática foi utilizada como ferramenta para simular o sistema de aquecimento e obter a nova temperatura de operação dos biodigestores obtida a partir do aquecimento da biomassa no interior do tanque de equalização e que será posteriormente direcionada para os biodigestores como efluente aquecido (Figura 2.7). A geometria do sistema de aquecimento e do biodigestor foram desenvolvidos no programa *SketchUp* (versão 17.2), enquanto a modelagem e simulação foram realizadas usando o programa *Energy Plus* (versão 8.7) e o *plugin Legacy Open Studio* (ENERGY PLUS, 2020).

O *Energy Plus* é utilizado mundialmente por pesquisadores, engenheiros e arquitetos para a simulação e análise de sistemas de aquecimento, iluminação, refrigeração, ventilação, sistemas de energia solar térmica e fotovoltaica, transferência de calor e outros fluxos de energia (HASSANEIN *et al.*, 2015). O programa possui recursos avançados, como uma biblioteca versátil com vários modelos disponíveis e a possibilidade de fazer simulações com passos de tempo de 30 segundos até 1 hora, além de permitir um período de estudo de até 1 ano completo e variáveis de saída com intervalos de tempo definidos pelo usuário, com fração de hora. O *Energy Plus* faz uso de arquivos de entrada, de saída e dados climáticos que incluem condições ambientais horárias ou sub-horárias (até um quarto de hora) e relatórios padrões reajustáveis pelo usuário (RESENDE, 2017). O programa permite ainda a introdução de geometrias e propriedades de materiais como variáveis de entrada, cujo balanço térmico é calculado em regime transiente.

Figura 2.7 – Interface do programa *Energy Plus*



Fonte: A autora

O uso deste conjunto de programas permitiu avaliar se o sistema é capaz de aquecer o efluente da temperatura ambiente até um valor entendido como ótimo para o processo anaeróbio, que seria a temperatura de 35°C (condição mesofílica), conforme indicado por Deng *et al.* (2016). Além disso, foi possível analisar o comportamento do aquecimento do efluente em relação ao número de painéis solares a fim de obter a temperatura ideal operacional dos biodigestores após o aquecimento, em termos de potencialização da produção de metano.

Os dados de entrada para a simulação do sistema de aquecimento foram: (i) arquivo climático e localização do estudo; (ii) dados de temperatura do solo; (iii) propriedades físicas e térmicas dos materiais que compõem o sistema; (iv) dados para modelo dos painéis solares e do painel radiante; e (v) período de execução da simulação.

2.2.4.1 Dados climatológicos e localização

Os dados climatológicos horários foram extraídos do arquivo climático da cidade de Viçosa (Minas Gerais - Brasil), uma vez que a estação meteorológica fica próxima da área rural de Teixeiras, 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). Os dados que compõem esse arquivo foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da estação meteorológica instalada na Universidade Federal de Viçosa (UFV), *campus* Viçosa, MG.

A granja se encontra na latitude de 20° 34' 07,2'' S, longitude de 42° 52' 01,6'' O, fuso horário UTC – 03:00, 678 m de altitude e inclinada 30° do eixo Norte (GOOGLE EARTH, 2020).

2.2.4.2 Dados de temperatura do solo

Os dados de temperatura do solo foram obtidos por meio dos sensores de monitoramento instalados na estação de tratamento de efluentes da granja (item 2.2.2). Os valores mensurados foram tabulados e organizados em médias mensais considerando dois períodos de execução da simulação, a partir dos dados de monitoramento dos anos de 2018 e 2019, a saber: (i) período quente (jan., fev. e mar.) e (ii) período frio (jun., jul., ago.).

2.2.4.3 Propriedades dos materiais que compõem o sistema

Nas Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam-se as características e propriedades termo físicas dos materiais construtivos adotados na estrutura do sistema de aquecimento e dos componentes internos e externos ao tanque de equalização, respectivamente. As dimensões adotadas para o tanque de equalização foram baseadas na vazão máxima afluyente do sistema de tratamento na suinocultura obtida no período de monitoramento (item 2.2.1). Foi considerada ainda uma camada de isolamento no fundo e laterais do tanque de equalização a fim de diminuir as perdas de calor para o solo. O material do isolamento adotado foi o poliestireno expandido (EPS).

Tabela 2.1 – Características e propriedades físicas e térmicas dos materiais do sistema de aquecimento

Sistema	Materiais	Dimensões e Características	Propriedades Físicas	Valores	Referências
Tanque de Equalização	Concreto	Rugoso (rugosidade)	Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1000	NBR 15220 (ABNT, 2003)
		0,1 m (espessura)			
		4,8 m (comprimento)	Conductividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1,75	
		4,8 m (largura)			
4,8 m (altura)	Massa Específica (kg m^{-3})	2300			
111 m^3 (volume)					
Isolamento Térmico	EPS	Médio (rugosidade)	Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1200	NBR 16866 (ABNT, 2020)
		0,01 m (espessura)			
			Conductividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0,1	
Material Componente do Painel Radiante	PEX	Macio (rugosidade)	Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	2300	NBR 15939 (ABNT, 2011)
		0,0008 m (espessura)			
		200,0 m (comprimento)	Conductividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0,38	
		0,013 m (diâmetro)			
	Massa Específica (kg m^{-3})	945			
Painel Solar	–	1,95 m (comprimento) 0,99 m (largura)	–	–	–

Tabela 2.2 – Características e propriedades físicas e térmicas dos componentes internos e externos ao tanque de equalização

Componente	Dimensões e Características	Propriedades Físicas	Valores	Referências
Biomassa	Alta rugosidade (rugosidade) 0,8 m (espessura) 130 m ² (área superficial)	Calor Específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	4186,8	TIMOSHENKO (1966)
		Condutividade Térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,58	
		Massa Específica (kg m ⁻³)	1040	DE ALMEIDA <i>et al.</i> (2017)
Solo saturado	Temperatura média do solo = 26,55°C Amplitude térmica mensal = 10,11°C Amplitude térmica diária = 0,44°C	Calor Específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	1550	OKE (2002)
		Condutividade Térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1,58	
		Massa Específica (kg m ⁻³)	2000	
Solo seco	Temperatura média do solo = 21,38°C Amplitude térmica mensal = 4,45°C Amplitude térmica diária = 0,15°C	Calor Específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	890	OKE (2002)
		Condutividade Térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,25	
		Massa Específica (kg m ⁻³)	1600	

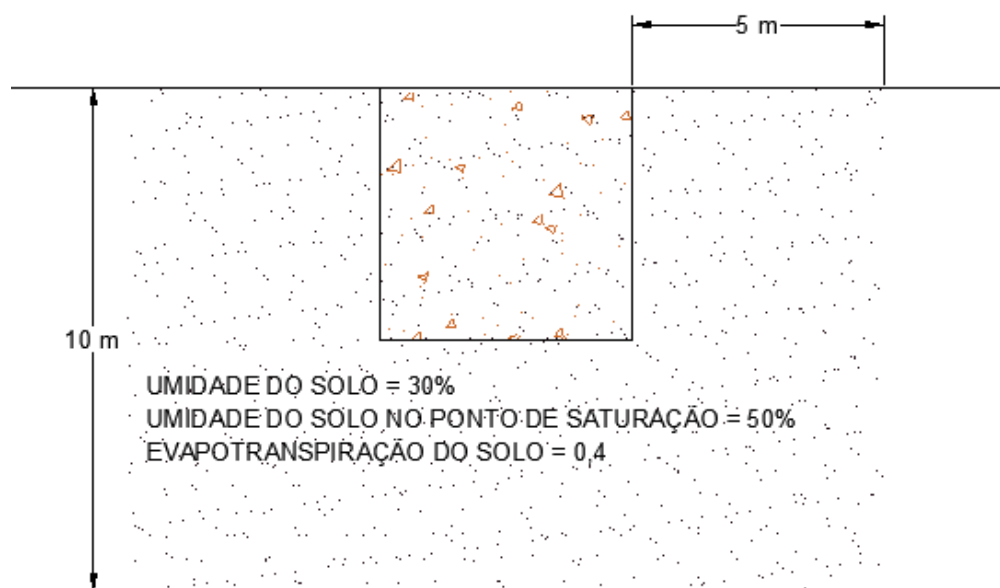
Devido às limitações do programa, a biomassa residente no interior do tanque de equalização foi aproximada à uma massa interna uniforme para o cálculo dos efeitos de inércia do material. Além disso, os valores de calor específico e condutividade térmica foram assumidos como sendo os mesmos da água, ao passo que a massa específica da biomassa foi adotada como sendo a massa específica do lodo de esgoto sanitário, conforme Almeida *et al.* (2017). A área útil ocupada pela biomassa (A_u) foi calculada dividindo o volume total do tanque ($V_T = 104 \text{ m}^3$) pela espessura da biomassa ($e = 0,8 \text{ m}$), obtendo um valor de $A_u = 130 \text{ m}^2$ (Tabela 2.2).

O *Energy Plus* possui restrições quanto ao valor máximo de espessura a ser adotado, de modo que a espessura da biomassa adotada foi o maior valor possível de ser reconhecido pelo programa. Essa simplificação não acarreta erros na modelagem da geometria, uma vez que o programa considera o interior do tanque como um espaço térmico homogêneo, assim desde que o volume seja mantido conforme o original, as condicionantes termodinâmicas permanecem sendo atendidas (VAZ, 2019).

O estudo da influência do solo nas trocas térmicas entre o tanque de equalização e o meio externo foi realizado por meio do método numérico de Xing (2014), conforme descrito por Resende (2017). As propriedades termo físicas do solo (Tabela 2.2) foram adotadas considerando dois cenários, a saber: (i) solo saturado para o período quente; e (ii) solo seco para o período frio. Dessa forma, os seguintes dados de entrada foram considerados: (i) temperatura média da superfície do solo ($^{\circ}\text{C}$), considerando os dois anos de estudo; (ii) amplitude térmica mensal média ($^{\circ}\text{C}$), considerando os meses equivalentes aos dois cenários (90 dias para o cenário quente e 92 dias para o cenário frio); e (iii) amplitude térmica diária média ($^{\circ}\text{C}$), considerando o dia mais frio dos períodos avaliados, como sendo a condição mais crítica (Tabela 2.2).

Além disso, para a análise de transferência de calor entre o solo e cada aresta do tanque de equalização foi considerada uma região de influência do solo com uma profundidade de 10 m, um perímetro de 5 m, uma relação largura/altura igual a 1, umidade do solo de 30% e umidade do solo de 50% no ponto de saturação (Figura 2.8). A evapotranspiração, que consiste na perda de umidade do solo, foi considerada como 0,4. O solo foi caracterizado como argiloso vermelho-amarelo distrófico (LVAd29), segundo o Mapa de Solos do Brasil e do Estado de Minas Gerais (EMBRAPA, 2011; FEAM, 2019).

Figura 2.8 – Representação do domínio do solo ao redor do tanque de equalização



Fonte: A autora

Os valores de profundidade e perímetro considerados foram obtidos por meio do método de diferenças finitas que é empregado no objeto *Ground Domain*. Esse método é baseado na substituição de derivadas em diferenças suficientemente pequenas em equações diferenciais ou empregando uma expansão na série de Taylor a fim de encontrar o valor de uma função f em relação a um ponto x (profundidade e perímetro) e um passo de tempo t (RIGO *et al.*, 2018; ENERGY PLUS, 2021a). Além disso, é necessário que a variação de t (Δt) seja suficientemente pequena, uma vez que quanto menor o Δt menor será o erro e, conseqüentemente, mais exata será a aproximação do modelo (ÇENGEL e BOLES, 2013).

2.2.4.4 Modelo dos painéis solares e painel radiante

Para o modelo dos painéis solares e do painel radiante foram utilizados modelos já existentes no *Energy Plus* e adaptados para a aplicação no projeto desejado. Para os painéis solares foi empregado o exemplo *SollarCollectorFlatPlateWater*, enquanto o painel radiante foi modelado de acordo com o arquivo *ZoneHVACLowTemperatureRadiantVariableFlow*. A geometria do painel solar foi desenhada no *SketchUp* como uma superfície bidimensional, inclinada aproximadamente 30° (valor da latitude acrescida de 10°) na direção leste (Tabela 2.1).

As características e propriedades das tubulações que integram o painel radiante estão apresentadas na Tabela 2.1. O Polietileno Reticulado Monocamada (PEX) foi considerado

como material constituinte do painel radiante, uma vez que se trata de um sistema que utiliza tubulações flexíveis e instalação contínua para transportar água quente, fria ou gás (FABRIS, 2017).

2.2.4.5 Período de execução da simulação

O período de execução da simulação ocorreu em duas fases, a partir dos dados de monitoramento dos anos de 2018 e 2019, a saber: (i) período quente (jan., fev. e mar.) e (ii) período frio (jun., jul. e ago.). Os meses pertencentes a cada período foram definidos de acordo com os valores obtidos pela simulação realizada analisando o ano completo e o sistema sem aquecimento. Assim, foi possível verificar a contribuição do sistema de aquecimento para a temperatura média do efluente comparando os meses com maior incidência de radiação (período quente) e os meses com menor incidência de radiação (período frio).

A variável de saída foi a temperatura do efluente (°C) em relação ao número de painéis solares modelados, considerando os dois cenários (solo seco e solo saturado). No modelo essa variável é a *zone mean air temperature*, que representa a temperatura média no interior da zona/tanque (ENERGY PLUS, 2021b).

Os estudos foram conduzidos considerando três condições de temperatura, a saber: (i) temperatura inicial sem considerar o aquecimento; (ii) temperatura do efluente de 30°C; e (iii) temperatura do efluente de 35°C. A escolha das temperaturas foi pautada na definição da temperatura ideal de operação dos biodigestores a fim de otimizar a eficiência do tratamento e a geração de biogás.

É importante ressaltar que embora a temperatura no interior do tanque de equalização seja a temperatura da biomassa, nesse estudo foi considerado que as temperaturas da biomassa e do efluente são equivalentes, uma vez que o objetivo do trabalho foi avaliar o aquecimento da massa líquida a ser enviada para o biodigestor.

Os dados empregados para a análise da correlação entre as temperaturas da biomassa residente e do efluente foram obtidos por meio dos sensores de monitoramento instalados na área em estudo (item 2.2.2). O cálculo da correlação foi realizado por meio dos valores médios das temperaturas considerando todo o período de estudo do monitoramento (jan. 2018 – dez. 2019) e também os cenários quente e frio.

2.2.5 Validação da simulação

Para validação da simulação foi realizada uma análise estatística comparando os dados simulados do sistema de aquecimento, considerando a o cálculo com a ausência de painéis

solares, com os dados experimentais obtidos por meio do monitoramento das temperaturas em escala real (item 2.2.2). Os valores validados foram as temperaturas do ambiente, da biomassa e do solo.

No modelo, as variáveis de saída para as respectivas temperaturas foram: (i) *zone outdoor air drybulb temperature*, que se caracteriza como a temperatura de bulbo seco do ar externo (°C) e é calculada pelo programa na altura acima do solo do centroide da zona; (ii) *zone mean air temperature*, que representa a temperatura média no interior do tanque (°C); e (iii) *zone domain basement floor interface temperature* e *zone domain basement wall interface temperature*, que fazem parte do objeto *SurfaceProperty:OtherSideConditionsModel* e representam, respectivamente, a temperatura fornecida às superfícies da base e das laterais do tanque considerando as condições de domínio do solo (°C) (ENERGY PLUS, 2021b). Nesse caso foi utilizada a média dos valores obtidos como dado de temperatura do solo.

A raiz do erro quadrático médio (REQM) e a raiz do erro quadrático médio relativo (REQMR) foram adotados como indicadores de desempenho (Equações 2.1 e 2.2). A REQM representa uma estimativa do desvio padrão entre os valores obtidos pela simulação e os valores medidos, enquanto a REQMR pode ser interpretada como o percentual que o desvio padrão de uma estimativa representa em relação à sua média. Desse modo, resultados mais próximos de zero indicam melhor desempenho dos modelos e melhor ajuste da validação (CECON *et al.*, 2012).

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em que:

REQM: raiz do erro quadrático médio; Y: valor obtido pela simulação; X: valor observado; n: número de valores analisados.

$$\text{REQMR} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{X}} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Em que:

REQMR: raiz do erro quadrático médio relativo; Y: valor obtido pela simulação; X: valor observado; n: número de valores analisados; \bar{X} : média dos valores observados.

2.2.6 Estimativa da produção de metano e de energia

A proposta do sistema de aquecimento do efluente de suinocultura objetivou a análise teórica da otimização da operação dos biodigestores por meio do aumento da produção de metano e, conseqüentemente, da geração de energia, considerando e comparando as três condições de temperatura (item 2.2.3)

Desse modo, a produção de metano nos BLC foi estimada de acordo com o modelo de Chen-Hashimoto (CHEN, 1983). Esse modelo foi recomendado por Lopes (2020) que, ao comparar modelos matemáticos para estimativa da geração de metano em biodigestores modelo lagoa coberta tratando efluentes de suinocultura, identificou que a referida metodologia representa um modelo confiável de predição.

As equações 2.3 e 2.4 determinam o valor da constante cinética de primeira ordem (k) de degradação da matéria orgânica e o crescimento específico máximo dos microrganismos (μ_{MAX}), respectivamente.

$$k = 0,6 + 0,0006 e^{(0,1185 \times SVT)} \quad (\text{Equação 2.3})$$

$$\mu_{MAX} = (0,013 \times T) - 0,129 \quad (\text{Equação 2.4})$$

Em que:

k: constante cinética (adimensional); SVT: sólidos voláteis totais (kg m^{-3}); μ_{MAX} : crescimento específico máximo dos microrganismos (d^{-1}); e T: temperatura da biomassa ($^{\circ}\text{C}$).

Com os valores obtidos nas equações 2.3 e 2.4, foi possível calcular a produção relativa de metano (B), considerando um rendimento final do metano de $0,36 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ SVT}$, que é indicado para condições mesofílicas (CHAE *et al.*, 2008) (Equação 2.5).

$$B = B_0 \left(1 - \frac{k}{(\mu_{MAX} \times TRH) - 1 + k} \right) \quad (\text{Equação 2.5})$$

Em que:

B: produção relativa de metano ($\text{m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ SVT}$); B_0 : rendimento final do metano ($\text{m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ SVT}$); k: constante cinética (adimensional); μ_{MAX} : crescimento específico máximo dos microrganismos (d^{-1}); e TRH: tempo de retenção hidráulica (d).

Na equação 2.6 apresenta-se a produção de metano estimada (Q_{CH_4}).

$$Q_{CH_4} = B \times Q \times SVT \quad (\text{Equação 2.6})$$

Em que:

Q_{CH_4} : produção de metano total ($m^3 CH_4 d^{-1}$); B : produção relativa de metano ($m^3 CH_4 kg^{-1} SVT$); Q : vazão afluyente ($m^3 d^{-1}$); e SVT : sólidos voláteis totais ($kg m^{-3}$).

De posse da estimativa de produção do metano, a potência elétrica total (PE) foi determinada a partir da Equação 2.7 (CETESB, 2006), considerando um poder calorífico do metano (P_c) de $35.900 kJ m^{-3}$ (ROSA *et al.*, 2016); uma eficiência de conversão do combustível (η_c) de 33% (CETESB, 2006); um rendimento do alternador (η_g) de 91,5% (WEG, 2020); e um rendimento do motogerador (η_r) de 80% (SOUSA, 2019).

$$PE = Q_{CH_4} \times P_c \times \eta_c \times \eta_g \times \eta_r \quad (\text{Equação 2.7})$$

Em que:

PE = potência elétrica total (kW); Q_{CH_4} = produção de metano total ($m^3_{CH_4} d^{-1}$); P_c = poder calorífico do metano ($kJ m^{-3}$); η_c = eficiência de conversão do combustível; η_g = rendimento do alternador; η_r = rendimento do motogerador.

Por meio dos dados da potência elétrica total, considerou-se um tempo diário de operação do motogerador (t_d) de 22 horas, o que permite fornecer um intervalo de tempo para manutenção do mesmo, bem como de eventuais paralizações do sistema (SOUSA, 2019). Na Equação 2.8 apresenta-se o cálculo da energia elétrica disponível para consumo (E) a partir do aproveitamento energético do biogás.

$$E = PE \times t_d \quad (\text{Equação 2.8})$$

Em que:

E = energia elétrica disponível por dia (kWh); PE = potência elétrica total (kW); t_d = tempo de funcionamento do motogerador ($h d^{-1}$).

2.2.7 Autossuficiência energética da granja

A partir dos dados obtidos por meio da análise do potencial energético do metano após a implantação do sistema de aquecimento (item 2.2.5), foi possível avaliar a fração da demanda energética da granja que poderia ser abastecida pela recuperação energética do biogás gerado

nos biodigestores, considerando e comparando as três condições de temperatura: (i) sem aquecimento; (ii) período quente e (iii) período frio (item 2.2.3)

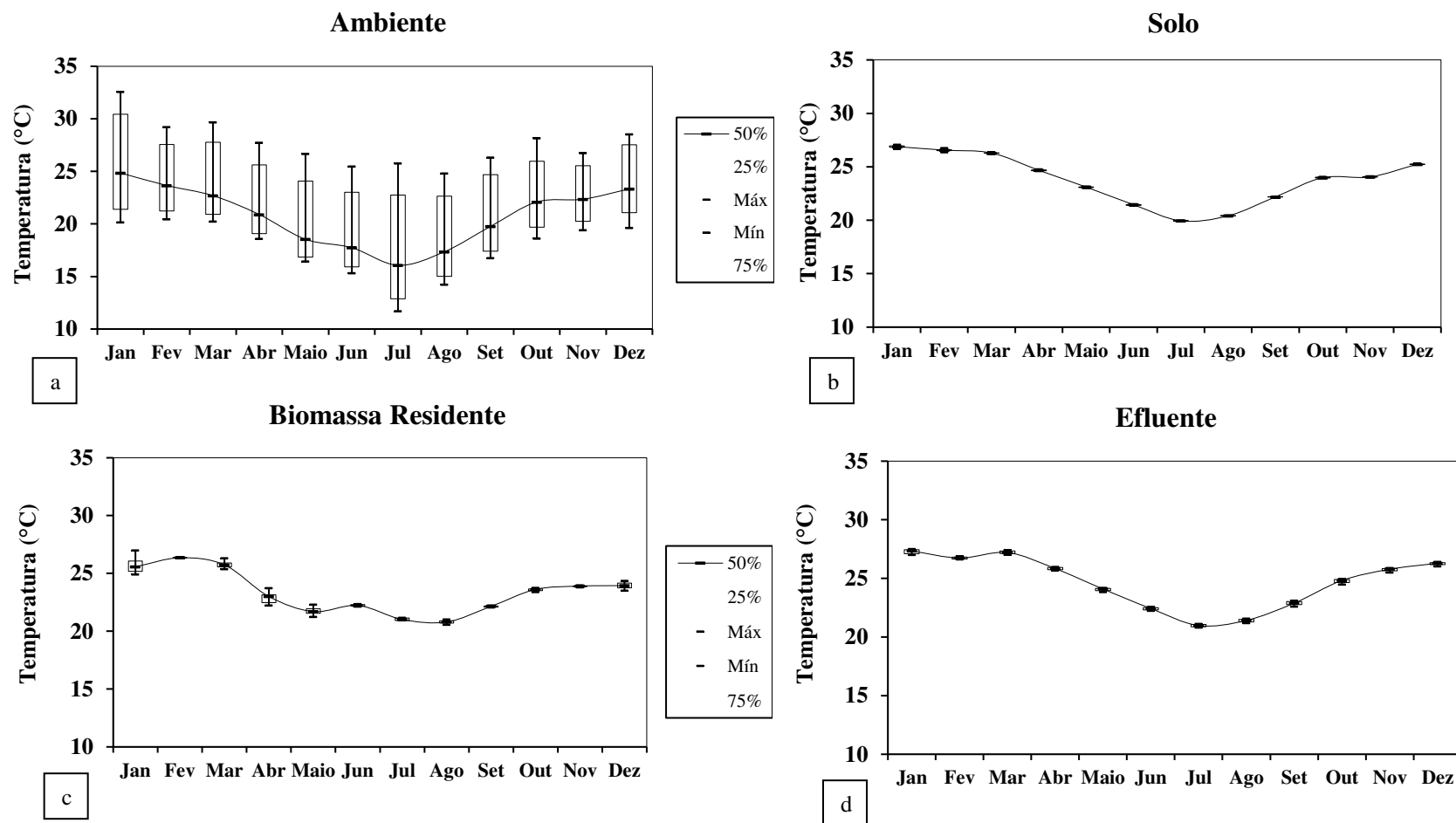
Desse modo, a energia consumida foi obtida a partir das contas de energia elétrica da granja considerando-se os meses pertencentes aos dois períodos de execução da simulação: (i) período quente (jan., fev. e mar./2019); e (ii) período frio (jul. e ago./2019). No período frio não foi considerado o mês de junho devido à falta de informações relativas à energia consumida nesse mês. De posse desses dados, foi considerada a média dos valores de energia consumida nos respectivos meses pertencentes aos dois cenários em estudo (períodos quente e frio). Além disso, foi realizada uma análise com um valor teórico de energia consumida de 1500 kWh d^{-1} , a fim de que fosse possível fazer uma comparação entre os períodos quente e frio a partir de uma mesma base.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Dados de monitoramento dos biodigestores

Na Figura 2.9 apresentam-se gráficos tipo *box-plot* com as variações das temperaturas médias do ambiente (a), solo (b), biomassa residente (c) e efluente (d) obtidas durante o período de monitoramento (jan./2018 - dez./2019) dos biodigestores antes da implantação do sistema de aquecimento. Esses resultados foram empregados no modelo e na análise da validação do sistema de aquecimento proposto (item 2.3.2).

Figura 2.9 – Representação das temperaturas média do ambiente (a), solo (b), biomassa residente (c) e efluente (d) monitoradas durante o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2019



De acordo com a Figura 2.9, o período frio (jun., jul., ago.) apresentou menores valores de temperatura nos quatro pontos monitorados, devido à menor incidência de radiação. Além disso, as temperaturas médias mensais do ambiente apresentaram maior variação de temperatura quando comparadas às temperaturas médias do solo, da biomassa residente e do efluente. Enquanto a maior temperatura encontrada para o ambiente foi de 33°C no mês de janeiro e a menor foi de 12°C no mês de julho, as temperaturas máxima e mínima para o solo, a biomassa e o efluente apresentaram valores maiores nos meses de janeiro, fevereiro e março (27°C) e valores menores nos meses de julho e agosto (20 a 21°C).

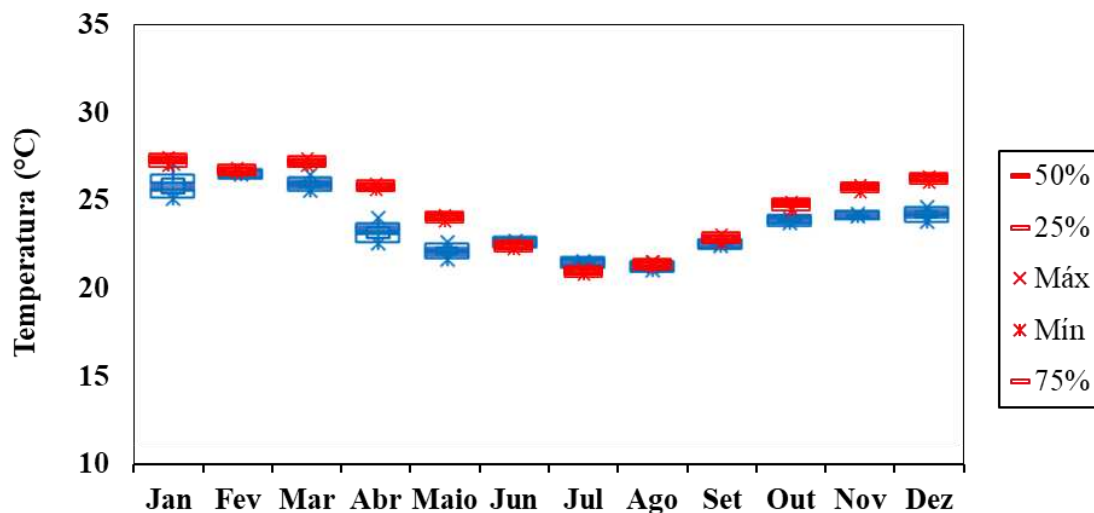
A baixa amplitude térmica da biomassa e do efluente está associada à elevada inércia térmica desses compostos e também ao contato com o solo, que apresentou comportamento semelhante. Esta característica da biomassa é essencial para um melhor funcionamento dos biodigestores, uma vez que evita a ocorrência de oscilações bruscas de temperatura no interior do reator e, assim, possibilita a manutenção das atividades metabólicas das bactérias anaeróbias no processo de degradação.

Além disso, a pequena variação de temperatura do solo está associada ao seu grau de saturação, uma vez que solos saturados apresentam uma maior capacidade de retenção térmica (HREIZ *et al.*, 2017). Desse modo, mesmo em regiões de clima tropical em que o período com maior incidência de radiação solar é também o mais chuvoso (predominância de solos saturados), o aumento da temperatura ambiente não influencia de modo expressivo na amplitude térmica do solo.

Entretanto, é possível notar que, em condições naturais, os biodigestores monitorados operam com uma temperatura abaixo da ideal para a digestão anaeróbia, o que pode ser considerado uma limitação ao tratamento mesmo em países de clima tropical. Assim, a implantação do sistema de aquecimento de efluente proposto seria uma alternativa para favorecer condições mesofílicas dentro dos reatores e, assim, potencializar a produção de biogás e aumentar a eficiência de degradação da matéria orgânica.

Foi ainda realizada a comparação entre a variação da temperatura da biomassa residente e a variação da temperatura do efluente durante o período de monitoramento dos biodigestores (item 2.2.3), a fim de analisar a possibilidade de considerar a equivalência entre esses dois parâmetros para a simulação (Figura 2.10). Essa simplificação se faz necessária uma vez que se pretende estudar as implicações do aquecimento da biomassa residente no interior do tanque de equalização quando essa massa líquida for direcionada para o biodigestor, em termos de produção de metano e eletricidade (item 2.3.3).

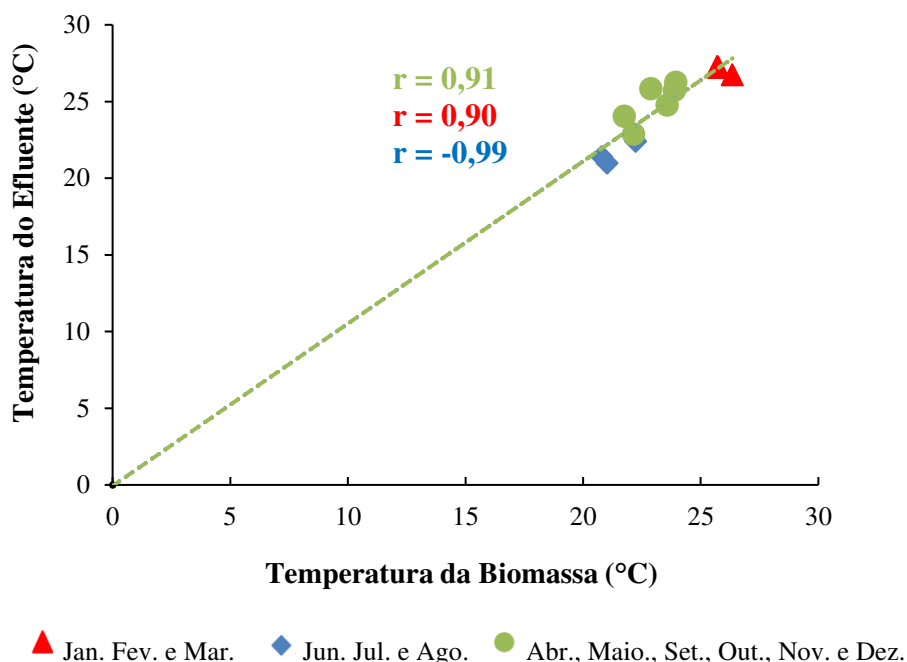
Figura 2.10 – Variação das temperaturas da biomassa residente (azul) e do efluente (vermelho) monitoradas ao longo de dois anos



Analisando-se a Figura 2.10 foi observado que nos meses mais quentes (janeiro, março, abril, outono, novembro e dezembro), as temperaturas da biomassa residente e do efluente apresentam maiores divergências em relação aos meses mais frios (junho, julho, agosto e setembro). Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que a temperatura da biomassa residente foi mensurada por sensores instalados no interior dos biodigestores, enquanto a temperatura do efluente foi obtida por sensores instalados na saída dos biodigestores (Figura 2.4). Desse modo, o efluente sofre maiores influências das condições climáticas do ambiente externo, enquanto a biomassa residente, por ter um maior tempo de contato com o ambiente interno dos biodigestores, apresenta temperaturas mais atenuadas.

Na Figura 2.11 apresenta-se a correlação entre a temperatura da biomassa residente e a temperatura do efluente considerando a média dos valores mensais durante os dois anos de monitoramento, com destaque para os períodos quente (jan., fev. e mar.) e frio (jun., jul., ago).

Figura 2.11 – Relação das temperaturas da biomassa residente e do efluente considerando os dois anos de monitoramento



O coeficiente de correlação (r) varia de -1 a 1, de modo que valores mais próximos desse limite correspondem a uma perfeita correlação positiva ou negativa, respectivamente (CECON *et al.*, 2012). Na análise do ano inteiro foi obtido uma correlação igual a 0,91 ($r = 0,91$), ao passo que, no período quente, esse valor foi de $r = 0,90$ e no período frio $r = -0,99$. Desse modo, o resultado obtido compreende uma correlação satisfatória, de modo a ser possível equiparar as temperaturas da biomassa e do efluente sem grandes perdas de especificidade.

Ainda analisando os parâmetros de monitoramento dos biodigestores antes da proposta de aquecimento, a Tabela 2.3 apresenta os resultados mensais e os valores médios obtidos no monitoramento da vazão (Q), dos sólidos voláteis totais (SVT) e do tempo de retenção hidráulica (TRH) no período em estudo (set. 2018 – ago. 2019).

Tabela 2.3 – Valores de sólidos voláteis totais (SVT), vazão (Q) e tempo de retenção hidráulica (TRH) obtidos pelo monitoramento dos biodigestores no período de estudo

Meses/ano	SVT (kg m ⁻³)	Q (m ³ d ⁻¹)	TRH (dias)
Setembro/2018	11,7	100,5	25,0
Outubro/2018	18,5	99,5	25,0
Novembro/2018	18,3	103,9	24,0
Dezembro/2018	9,3	102,8	24,0
Janeiro/2019	8,0	101,8	25,0
Fevereiro/2019	13,3	105,6	24,0
Março/2019	19,7	107,2	23,0
Abril/2019	15,6	101,5	25,0
Mai/2019	11,9	103,9	24,0
Junho/2019	21,6	103,9	24,0
Julho/2019	14,1	99,5	25,0
Agosto/2019	22,3	98,0	25,0
Média	15,4	102,3	24,0

Os valores de sólidos voláteis no afluente variaram de 8,0 kg m⁻³ (janeiro) a 22,3 kg m⁻³ (agosto), com um valor médio de 15,4 kg m⁻³. Essa variação expressiva de SVT pode estar relacionada com o padrão de consumo de água na propriedade, diluição dos dejetos e oscilações sazonais na produção, uma vez que em dezembro há uma maior venda de suínos, contribuindo com uma menor geração de matéria orgânica (SOUSA, 2019). Silva *et al.* (2015) ao estudarem dois biodigestores modelo lagoa coberta no estado do Paraná, observaram uma concentração média de SVT de 18,9 kg m⁻³ no afluente, valor próximo ao valor médio obtido nesse estudo.

A vazão apresentou pequenas variações, com mínima observada no mês de agosto (98,0 m³ d⁻¹), máxima no mês de março (107,2 m³ d⁻¹) e média de 102,3 m³ d⁻¹. A vazão é dependente principalmente do número de animais, frequência de limpeza e rotina de manutenção na granja (LOPES, 2020). O TRH também apresentou pequenas variações e de modo inversamente proporcional à vazão, com uma média de 24 dias. Segundo Palhares e Gebler, (2014) o tempo de retenção hidráulica em biodigestores modelo lagoa coberta varia entre 20 a 40 dias, de modo que é possível afirmar que o BLC operou dentro de uma faixa esperada.

A fim de que fosse possível analisar apenas a relação da temperatura da biomassa e a geração de biogás, foram empregados os valores médios desses parâmetros (SVT, vazão e TRH) nos cálculos de produção de metano e de eletricidade para o período de estudo (item 2.2.6).

2.3.2 Validação da Simulação

Na Tabela 2.4 apresentam-se os resultados dos indicadores de desempenho das temperaturas médias horárias do ambiente, biomassa e solo obtidas pelo modelo, considerando o sistema sem aquecimento, e comparando com as temperaturas aferidas pelos sensores instalados na unidade de tratamento de dejetos da granja (item 2.3.1). Os resultados de temperatura obtidos pela simulação são provenientes do arquivo climático empregado no modelo (item 2.2.3.1). A avaliação foi realizada para os períodos quente e frio.

Tabela 2.4 – Indicadores de desempenho para diferentes perfis de temperatura considerando os cenários quente e frio

Temperatura / Período		Quente	Frio
Ambiente	REQM (°C)	4,2	3,7
	REQMR (%)	16,9	20,2
Biomassa residente	REQM (°C)	2,8	2,2
	REQMR (%)	10,7	9,9
Solo	REQM (°C)	1,4	4,2
	REQMR (%)	5,4	20,2

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

Analisando-se a Tabela 2.4 pode ser observado que a temperatura simulada do solo no período quente foi a que obteve valores mais próximos dos dados obtidos no monitoramento (5,4%) e a temperatura do solo no período frio foi a que mais se afastou dos valores reais (20,2%). As temperaturas da biomassa em ambos os cenários apresentaram comportamento semelhante com 10,7% (período quente) e 9,9% (período frio) de desvio padrão em relação à média comparando os dados simulados e reais. Em relação às temperaturas do ambiente, o REQMR também não diferiu muito nos períodos quente e frio, com valores de 16,9% e 20,2%, respectivamente.

Em linhas gerais, a validação não obteve resultados muito discrepantes entre as temperaturas avaliadas, o que atesta que os erros não estão associados com o modelo, uma vez que a temperatura ambiente é independente da geometria. Desse modo, é provável que as divergências entre os dados obtidos na simulação e os dados monitorados estejam associadas principalmente às dificuldades inerentes aos estudos em escala real, visto que existem fontes externas que podem comprometer a acurácia dos dados, como falhas nas medições, irregularidades nos sensores e limitações do próprio modelo.

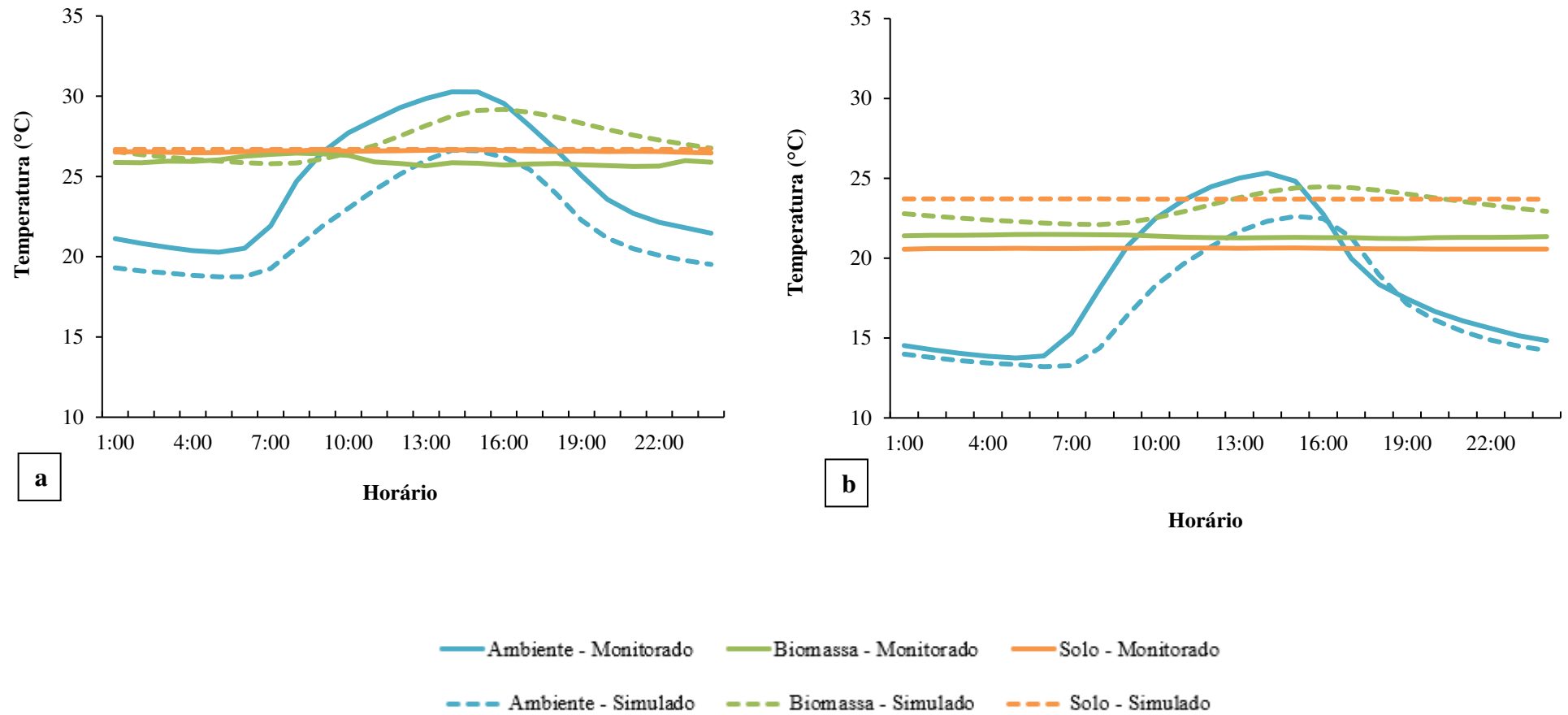
Outro ponto a ser considerado é que o ano representativo que compõe o arquivo climático é obtido por meio de um tratamento estatístico em uma série temporal de dez anos; ao passo que os dados reais empregados nesse estudo foram obtidos pela média dos dados mensurados nos anos de 2018 e 2019, de modo que são valores mais sensíveis às variações climáticas.

Além disso, os dados reais de biomassa foram medidos por sensores instalados no interior dos biodigestores, ao passo que no modelo foi considerada a temperatura da biomassa no interior do tanque de equalização. Além de apresentarem volume e formato diferentes, o tanque não foi modelado levando em consideração a formação de biogás, devido ao tempo previsto de residência da biomassa no interior do tanque.

Lopes (2020), ao realizar um estudo de simulação envolvendo trocas térmicas que ocorrem em um biodigestor modelo lagoa coberta localizado na mesma granja, comparou os resultados provenientes de um cenário considerando a temperatura interna como uma média das temperaturas do biogás e da biomassa, e um ambiente interno que separava as duas temperaturas. A autora constatou que o segundo cenário apresentou melhor desempenho, uma vez que a biomassa e o biogás apresentam propriedades térmicas distintas (LOPES, 2020). Assim, é possível que essas diferenças tenham contribuído com os resultados da validação.

Na Figura 2.12 apresentam-se as variações das temperaturas do ambiente, biomassa e solo ao longo do dia, a partir de médias horárias de todo o período em estudo, provenientes do monitoramento (linha contínua) e obtidas por meio da simulação (linha tracejada), considerando zero painéis solares, nos cenários quente (a) e frio (b).

Figura 2.12 – Variação das temperaturas do ambiente, da biomassa residente e do solo, a partir de médias horárias, para dados simulados e monitorados nos períodos quente (a) e frio (b)



Como pode ser observado, as médias horárias das temperaturas do ambiente nos períodos quente e frio seguiram a mesma tendência no decorrer do dia, com valores mais elevados das 07:00 às 19:00h, atingindo a temperatura máxima às 14:00h (27°C no simulado e 30°C no monitorado para o período quente; 23°C no simulado e 25°C no monitorado para o período frio). A temperatura mínima foi obtida às 05:00h (19°C no simulado e 20°C no monitorado para o período quente; 13°C no simulado e 14°C no monitorado para o período frio).

Com relação à temperatura do solo, houve pequenas variações ao longo do dia em ambos os cenários (simulação e monitoramento), porém com resultados bem mais próximos entre os cenários no período quente do que no período frio. No período quente as temperaturas máximas e mínimas simuladas e monitoradas ficaram na faixa dos 27°C, enquanto no período frio as temperaturas máximas e mínimas simuladas foram de aproximadamente 24°C e as monitoradas máximas e mínimas de 21°C. As baixas variações no ciclo diário das temperaturas do solo podem ser explicadas pelo fato de que o solo apresenta uma grande inércia térmica, favorecendo o atraso térmico e a condução de calor e, assim, atenuando os picos de temperatura. Além disso, as variações de temperatura podem alterar de acordo com a umidade do solo, como foi verificado nesse estudo em relação ao período quente (solo saturado) e período frio (solo seco) (SOUZA *et al.*, 2011).

A biomassa, por sua vez, apresentou pequenas variações nos resultados obtidos do monitoramento, com máximas e mínimas de 26°C no período quente e 21°C no período frio. Esse resultado pode ser decorrente da grande capacidade de amortização e mistura do fluido no interior do reator, uma vez que o volume interno do BLC é muito superior ao volume de efluente aplicado, homogeneizando a temperatura interna. Nos dados da simulação as temperaturas máximas foram obtidas às 16:00h, com 29°C no período quente e 24°C no período frio, enquanto as temperaturas mínimas foram alcançadas às 08:00h, com 26°C no cenário quente e 22°C no cenário frio.

Como anteriormente citado, é possível que essa variação nas temperaturas simuladas e monitoradas da biomassa seja devido às diferenças entre o modelo real (biodigestor), no qual foram obtidos os dados, e o simulado (tanque de equalização), uma vez que a densidade e viscosidade do fluido no modelo real é diferente em relação ao simulado e, portanto, as trocas térmicas convectivas podem se diferenciar, além das diferenças de temperatura externas mencionadas no parágrafo anterior.

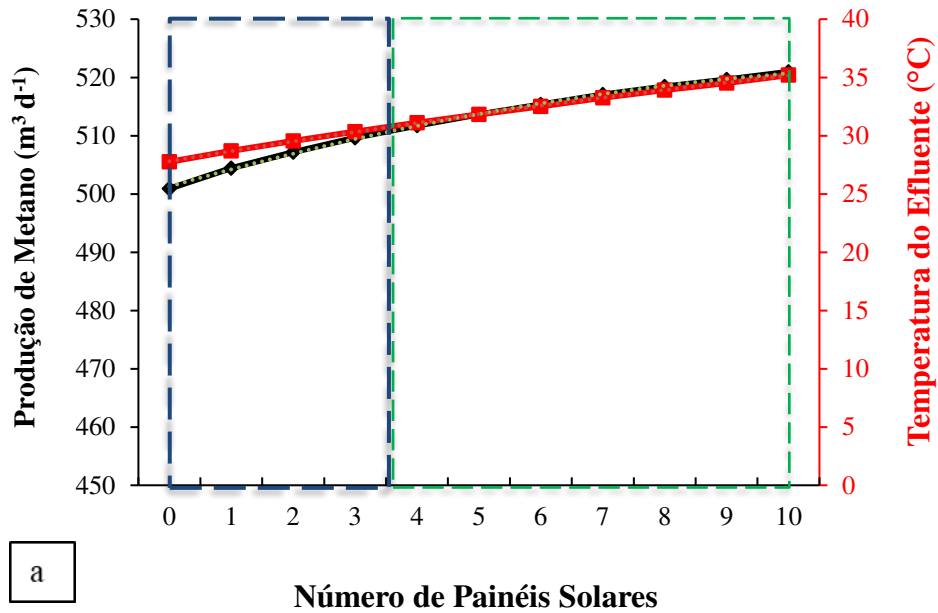
2.3.3 Sistema de aquecimento por energia solar

Na Figura 2.13 visualiza-se a relação entre o número de painéis solares calculados por meio da modelagem matemática, o comportamento da temperatura atingida pela biomassa no interior do tanque de equalização e a produção de metano, após essa biomassa ser direcionada para o biodigestor, durante os períodos quente (a) e frio (b). Os resultados foram apresentados como um valor médio dos respectivos meses para os dois cenários estudados. Os valores referentes a zero painéis solares foram obtidos por meio do modelo do sistema de aquecimento e não do monitoramento real da granja.

No cenário referente ao período quente (jan., fev., mar), a temperatura inicial (sem o cálculo com os painéis solares) foi de 28°C e a produção teórica de metano foi de 501 m³ d⁻¹. O sistema atingiu a temperatura de 30°C com o cálculo de três painéis solares operando e, nessa temperatura, a produção teórica de metano foi de 510 m³ d⁻¹. A temperatura de 35°C foi obtida após o cálculo de dez painéis solares operando e uma produção teórica de metano de 521 m³ d⁻¹. Desse modo, houve um aumento de 2°C na temperatura da biomassa e de aproximadamente 9 m³ d⁻¹ na geração de metano com o cálculo de três painéis solares e um aumento de 7°C na temperatura da biomassa e de aproximadamente 20 m³ d⁻¹ na geração de metano com o cálculo de dez painéis solares.

Em relação ao período frio (jun., jul., ago.), a temperatura inicial (sem considerar os painéis solares) foi de 21°C e a produção teórica de metano foi de 458 m³ d⁻¹. O sistema atingiu a temperatura de 30°C com o cálculo de treze painéis solares operando e, nessa temperatura, a produção teórica de metano foi de 508 m³ d⁻¹. A temperatura de 35°C foi obtida após o cálculo de vinte e oito painéis solares operando e uma produção teórica de metano de 521 m³ d⁻¹. Desse modo, houve um aumento de 9°C na temperatura da biomassa e de aproximadamente 50 m³ d⁻¹ na geração de metano com o cálculo de treze painéis solares e um aumento de 14°C na temperatura da biomassa e de aproximadamente 63 m³ d⁻¹ na geração de metano com o cálculo de vinte e oito painéis solares.

Figura 2.13 – Relação entre a temperatura do efluente, produção teórica de metano e número de painéis solares para os períodos quente (a) e frio (b)

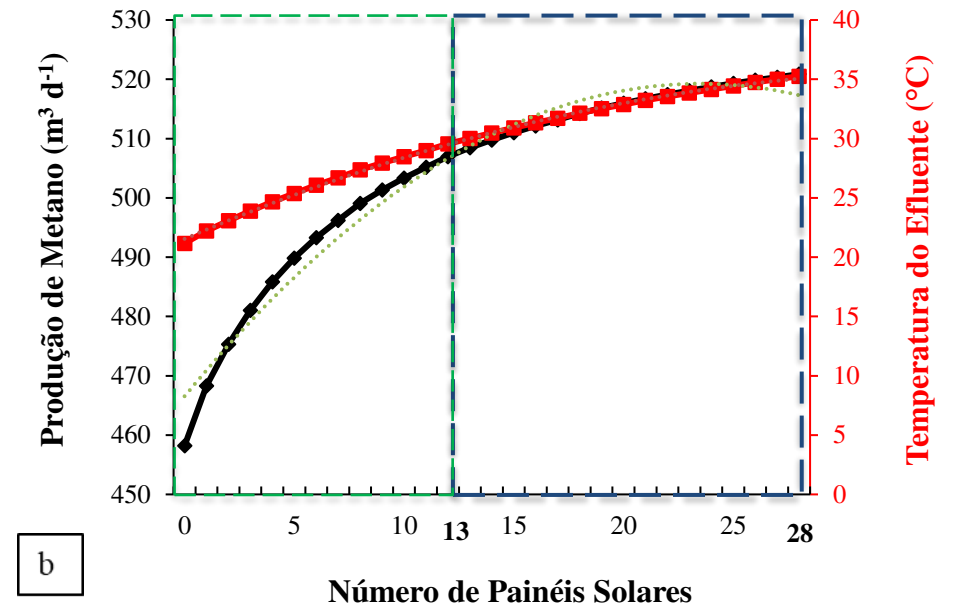


$$y = -0,0144x^2 + 0,9084x + 26,913$$

$$R^2 = 0,9998$$

$$y = -0,1092x^2 + 3,2507x + 498,16$$

$$R^2 = 0,9989$$



$$y = -0,0113x^2 + 0,8199x + 20,736$$

$$R^2 = 0,9991$$

$$y = -0,0955x^2 + 4,678x + 461,97$$

$$R^2 = 0,9765$$

Entretanto, é notável que a curva relativa à produção teórica de metano (preta) é mais acentuada até o sistema atingir a temperatura de 30°C e cresce de modo mais linear acima desse valor de temperatura até atingir a temperatura ideal da faixa mesofílica (35°C). Além disso, o acréscimo na produção teórica de metano não justifica a elevada quantidade de painéis solares necessários para o sistema operar na temperatura de 35°C em ambos os cenários. Desse modo, elevar a temperatura da biomassa até 30°C dentro do tanque de equalização e direcionar esse efluente aquecido até o biodigestor foi considerada como condição ideal para otimizar a operação do reator.

Conclusões semelhantes referentes a seleção de temperaturas intermediárias como melhor custo-benefício para a produção energética são encontradas na literatura. Souza *et al.* (2005) estudaram um biodigestor de bancada em batelada abastecido com dejetos suínos submetido a três faixas de temperatura (25°C, 35°C e 40°C) e, após 71 dias de experimento, verificaram que as produções de biogás nos biodigestores operando à 35°C e 40°C não diferiram estatisticamente. Desse modo, considerando os gastos energéticos para aquecer o reator até 40°C, os autores indicaram que a melhor temperatura entre as avaliadas seria a de 35°C (SOUZA *et al.*, 2005).

Chae *et al.* (2008) ao estudarem a digestão anaeróbia de dejetos suínos em um reator anaeróbio de bancada nas temperaturas de 25°C, 30°C e 35°C, observaram que a degradação à 25°C foi a mais lenta e que os rendimentos de produção de metano à 30 e 35°C foram semelhantes, mas superiores em comparação com a temperatura de 25°C. Assim, levando em consideração o balanço de energia líquido entre a demanda de energia para aquecer o sistema e a produção de energia advinda do rendimento de metano, os autores apontaram que a temperatura de operação do sistema é mais viável a 30°C (CHAE *et al.*, 2008).

Nas equações 2.9 e 2.10 apresentam-se as linhas de tendência que descrevem o crescimento das curvas de temperatura e os coeficientes de determinação (R^2) para os períodos quente e frio, respectivamente.

$$y = - 0,0144x^2 + 0,9084x + 26,913 \text{ e } R^2 = 0,999 \quad (\text{Equação 2.9})$$

$$y = - 0,0113x^2 + 0,8199x + 20,736 \text{ e } R^2 = 0,999 \quad (\text{Equação 2.10})$$

Nas equações 2.11 e 2.12 apresentam-se as linhas de tendência que descrevem o crescimento das curvas de produção teórica de metano e os coeficientes de determinação (R^2) para os períodos quente e frio, respectivamente.

$$y = -0,1092x^2 + 3,2507x + 498,736 \text{ e } R^2 = 0,999 \quad (\text{Equação 2.11})$$

$$y = -0,0955x^2 + 4,678x + 461,97 \text{ e } R^2 = 0,977 \quad (\text{Equação 2.12})$$

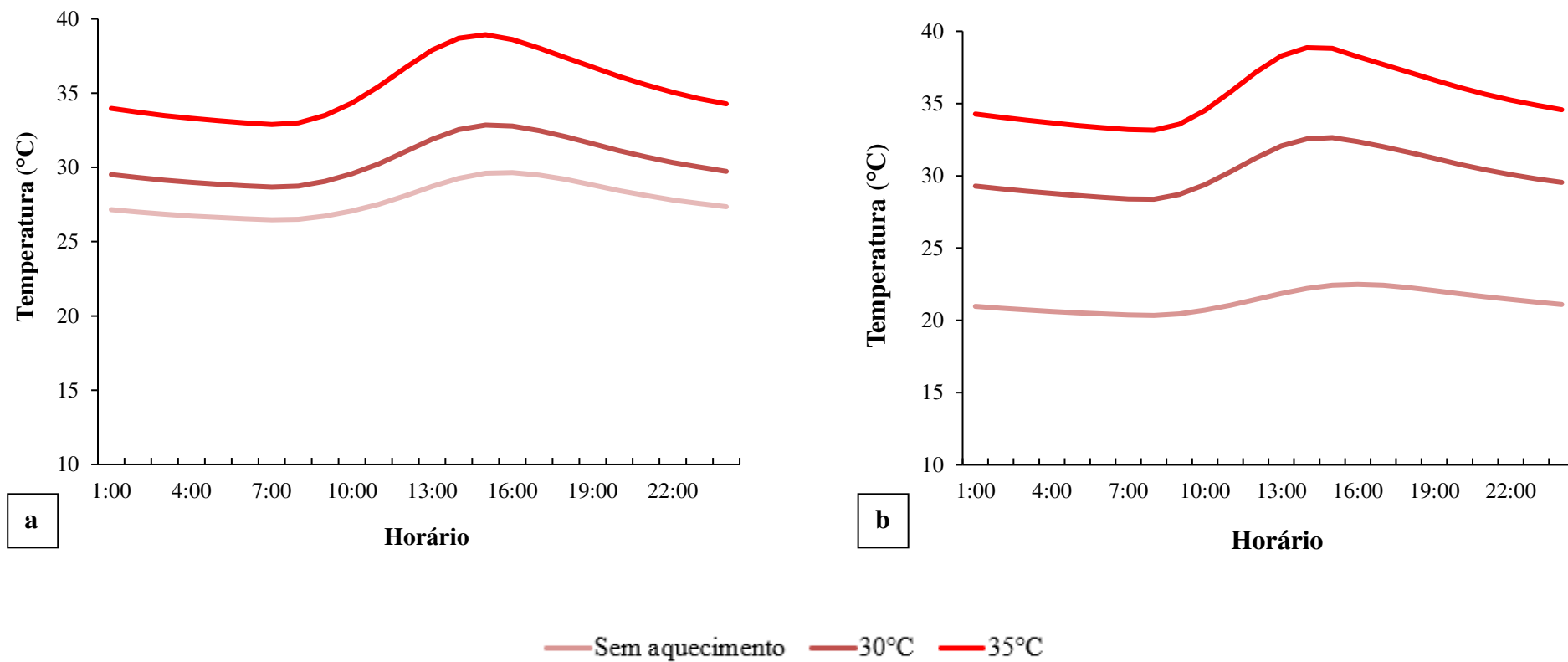
O coeficiente de determinação (R^2) varia entre 0 e 1, com valores mais próximos de 1 indicando uma forte dependência entre a variável x (número de painéis solares) e as variáveis y (temperatura e produção de metano) (CECON *et al.*, 2012). Desse modo, as equações obtidas apresentaram um bom ajuste entre as variáveis e evidenciam que os dados estão bem próximos da linha de regressão ajustada. Com isso é possível obter relações unitárias considerando as variáveis dependentes e independentes.

Foi também realizado o estudo em relação à variação das temperaturas da biomassa ao longo do dia, a partir de médias horárias de todo o período em estudo, considerando as temperaturas inicial (zero coletores no modelo), 30°C e 35°C, nos cenários quente (a) e frio (b) (Figura 2.14).

Analisando a Figura 2.14 ao passo que a curva que representa a temperatura inicial (sem aquecimento) no período quente segue o perfil das curvas que representam as temperaturas de 30°C e 35°C para o mesmo cenário, a curva que representa o sistema sem aquecimento no período frio apresenta uma menor variação ao longo do dia. Essa distinção se dá principalmente por influência das condições climáticas às quais os biodigestores estão susceptíveis, uma vez que a principal fonte de calor nos BLC é a radiação solar (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

Desse modo, como a radiação é mais intensa no período quente, há uma maior flutuação da temperatura no decorrer do dia nesse cenário em relação ao período frio. O sistema sem aquecimento atinge a maior temperatura às 16:00h (30°C no período quente e 22°C no período frio) e a menor temperatura às 08:00h (26°C e 20°C, respectivamente).

Figura 2.14 – Variação das temperaturas, a partir de médias horárias, considerando a temperatura inicial, 30° C e 35° C para os períodos quente (a) e frio (b)



É possível observar ainda que, em ambos os cenários (período quente e período frio), as curvas que representam as temperaturas de 30°C e 35°C apresentaram variações muito similares, com valores mais elevados das 10:00 até 17:00h e atingindo as temperaturas máxima às 15:00h (aproximadamente 33° e 38°C, respectivamente) e mínima às 08:00h (aproximadamente 28°C e 33°C, respectivamente). Esse resultado é coerente, uma vez que o sistema de aquecimento foi programado para funcionar das 07:00 às 17:00h, de modo que a biomassa dentro do tanque de equalização vai recebendo e perdendo calor gradualmente.

Entretanto, é perceptível que o perfil de variação da temperatura de 35°C demonstrou uma curvatura mais acentuada em relação ao ganho de calor em ambos os cenários, uma vez que para atingir esse valor de temperatura foi necessário pressupor a operação de uma quantidade maior de painéis solares. Além disso, a pequena diferença entre as curvas com relação aos cenários quente e frio demonstra que as condições de solo saturado e seco, respectivamente, não apresentam influência expressiva nas variações de temperaturas em sistemas aquecidos.

Ainda, é notável que mesmo com as variações ao longo do dia, o sistema atinge as temperaturas desejadas para o aquecimento da biomassa, considerando as médias dos valores obtidos para ambos os períodos em estudo. Desse modo, a massa líquida após ser aquecida pode ser destinada diariamente ao biodigestor na forma de efluente aquecido e contribuir com a otimização da eficiência do tratamento e produção de biogás, como verificado na Figura 2.13.

2.3.4 Autossuficiência energética da granja

Na Tabela 2.5 apresentam-se os resultados compilados da produção teórica de metano e a correspondente geração de eletricidade considerando as três temperaturas analisadas (temperatura inicial sem aquecimento, temperatura do efluente com aquecimento a 30°C e temperatura do efluente com aquecimento a 35°C) (item 2.2.3), bem como a demanda energética teórica e real da granja para os períodos quente e frio (item 2.2.7). De posse desses valores, foi possível calcular a autossuficiência energética teórica e real na granja a partir da recuperação do biogás como fonte de eletricidade. Nesse item, os cálculos foram feitos já considerando a equivalência entre biomassa e efluente (item 2.3.1) e que o efluente aquecido foi direcionado para o biodigestor.

Tabela 2.5 – Detalhamento da energia fornecida para a granja por meio da conversão do metano em eletricidade comparando os cenários com e sem aquecimento do efluente

Período	Temperatura (°C)	Produção de Metano (m ³ d ⁻¹)	Eletricidade Produzida (kWh)	Demanda Energética (kWh)		Autossuficiência Energética ¹ (%)	
				Teórica	Real	Teórica	Real
Quente (Jan., Fev., Mar.)	28	501	1106	1500	1632	73,7	67,8
	30	510	1125			75,0	68,9
	35	521	1150			76,7	70,5
Frio (Jul., Ago.)	21	458	1012	1500	1435	67,5	70,5
	30	508	1128			75,2	78,6
	35	521	1154			76,9	80,4

¹Autossuficiência energética (%) = (eletricidade produzida / demanda energética) x 100

Analisando-se o período quente, o aumento na produção teórica de metano considerando a temperatura inicial (28°C) e a temperatura de 30°C foi de 1,8%, ao passo que entre a temperatura inicial e 35°C foi de 4,0%, e entre 30°C e 35°C foi de 2,2%. O acréscimo na energia fornecida para a granja seguiu a mesma proporção, com pouca diferença entre o aumento analisando as temperaturas inicial e 30°C e as temperaturas de 30°C e 35°C.

Em relação ao período frio, o aumento na produção teórica de metano considerando a temperatura inicial (21°C) e a temperatura de 30°C foi de 10,9%, ao passo que entre a temperatura inicial e 35°C foi de 13,8%, e entre 30°C e 35°C foi de 2,6%. O acréscimo na energia fornecida para a granja seguiu a mesma proporção, com pouca diferença entre o aumento analisando as temperaturas de 30°C e 35°C.

Dong e Lu (2013) utilizando energia solar para aumentar a eficiência da digestão anaeróbia de dejetos suínos em tanques de fermentação anaeróbia instalados em uma suinocultura no sul da China, obtiveram um incremento na produção de biogás de 11,2% e um aumento de 14,3% na conversão do biogás em energia elétrica. Esses resultados foram convergentes com o presente estudo, principalmente considerando o cenário frio, que se assemelha mais com as condições climáticas no Sul da China. Outros autores também reportaram o impacto do aquecimento do efluente no interior de reatores anaeróbios no que tange ao aumento da produção de biogás, a partir do emprego da energia solar (AXAOPOULOS e PANAGAKIS, 2003; CHEN e QIM, 2014; DENG *et al.*, 2016; HASSANEIN *et al.*, 2015; KOVAR e ERYASAR, 2007).

A autossuficiência energética da granja representa a contribuição da energia produzida proveniente do beneficiamento do biogás em relação à demanda energética da granja. Analisando os resultados obtidos a partir de uma mesma base teórica (1500 kWh), observou-se que a autossuficiência energética para ambos os períodos quente e frio foi similar, com uma maior diferença proveniente do cenário sem aquecimento (temperatura inicial). Esse resultado é coerente visto que a eletricidade produzida a partir da recuperação energética do biogás é semelhante entre os períodos nas temperaturas de 30°C e 35°C, uma vez que os cálculos de energia e produção de metano são dependentes da temperatura.

Por outro lado, ao avaliar os resultados provenientes da energia consumida real, é notável que no período frio houve uma maior contribuição na energia fornecida proveniente do beneficiamento do biogás, uma vez que a temperatura inicial no sistema e a energia consumida eram menores em relação ao período quente. Além disso, para ambos os períodos, o aporte de

energia fornecida entre as temperaturas inicial e 30°C e entre as temperaturas inicial e 35°C diferiram pouco.

Assim, é possível afirmar que o aquecimento do efluente até a temperatura de 30°C pode contribuir com parte expressiva da demanda energética da granja e representa o melhor custo-benefício para o aumento da sustentabilidade energética da suinocultura.

A Figura 2.15 mostra a relação entre o número de painéis solares, a produção teórica de metano e a geração de eletricidade durante os períodos quente (a) e frio (b). Os resultados foram apresentados como um valor médio dos respectivos meses para os dois cenários estudados. Os valores referentes a zero painéis solares foram obtidos por meio do modelo.

Analisando a Figura 2.15, é possível notar que a curva de crescimento da eletricidade produzida a partir do cálculo considerando três e treze painéis para os cenários quente e frio, respectivamente, apresenta uma curvatura menos acentuada em relação à curva de crescimento da produção teórica de metano. Essa verificação corrobora com os resultados descritos no item 2.3.3 em relação ao número de painéis solares e a temperatura ideal de operação dos biodigestores após o aquecimento do efluente.

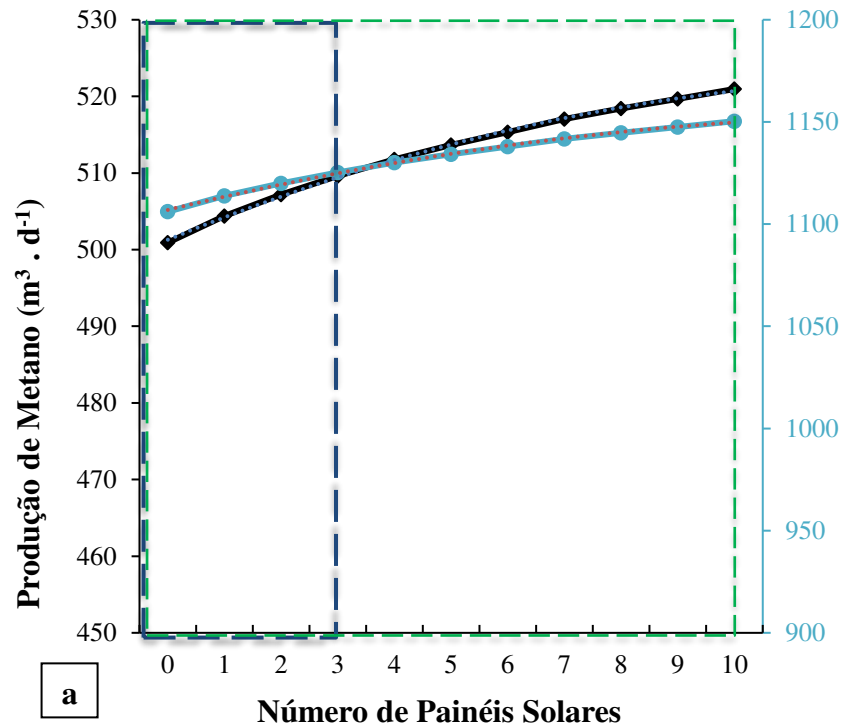
As linhas de tendência que descrevem o crescimento das curvas de produção teórica de metano nos cenários quente e frio estão apresentadas no item 2.3.3 (Equações 2.11 e 2.12), enquanto as linhas de tendência que descrevem o crescimento das curvas de eletricidade produzida para os períodos quente e frio estão descritas nas Equações 2.13 e 2.14, respectivamente, juntamente com o coeficiente de determinação (R^2).

$$y = -0,2412x^2 + 7,178x + 1100 \text{ e } R^2 = 0,999 \quad (\text{Equação 2.13})$$

$$y = -0,2109x^2 + 10,33x + 1020,1 \text{ e } R^2 = 0,977 \quad (\text{Equação 2.14})$$

Assim como obtido no item 2.3.3, as equações apresentam um bom ajuste entre as variáveis e uma boa aproximação dos dados com a linha de regressão ajustada.

Figura 2.15 – Relação entre produção teórica de metano, eletricidade produzida e número de painéis solares para os períodos quente (a) e frio (b)

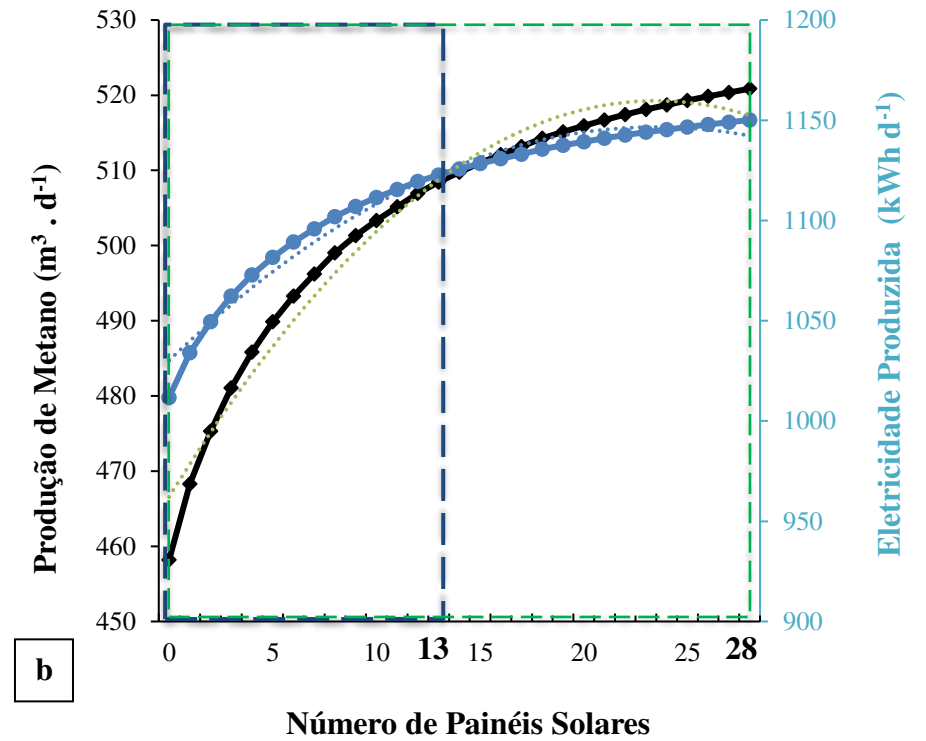


$$y = -0,2412x^2 + 7,178x + 1100$$

$$R^2 = 0,9989$$

$$y = -0,1092x^2 + 3,2507x + 498,16$$

$$R^2 = 0,9989$$



$$y = -0,2109x^2 + 10,33x + 1020,1$$

$$R^2 = 0,9765$$

$$y = -0,0955x^2 + 4,678x + 461,97$$

$$R^2 = 0,9765$$

2.4 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo apresentar uma proposta de aquecimento de efluente de suinocultura por meio do emprego de painéis solares e trocas de calor entre a água aquecida e a biomassa residente no interior de um tanque de equalização. O efluente então aquecido seria direcionado para um biodigestor modelo lagoa coberta a fim de ser possível estudar o potencial incremento da produção de metano e energia proveniente do aquecimento.

Os dados monitorados antes da implantação do sistema de aquecimento mostraram que o funcionamento dos biodigestores estava abaixo da temperatura considerada ideal para a digestão anaeróbia, de modo a comprometer a eficiência do tratamento e a produção de biogás.

O aquecimento de efluentes por meio de recuperação de energia solar se apresentou como uma alternativa para potencializar a produção de metano, principalmente para o período frio devido à maior amplitude térmica.

No período frio, a curva que representa o sistema sem aquecimento apresentou uma menor variação ao longo do dia em relação ao período quente, porém em ambos os períodos, as curvas das temperaturas de 30°C e 35°C apresentaram variações muito similares, indicando que condições de solo saturado e seco não representam influência expressiva nas variações de temperaturas em sistemas aquecidos.

O aumento do número de painéis solares não implicou necessariamente em contribuições mais expressivas na produção de metano e energia, uma vez que, para os períodos quente e frio, a temperatura de 30°C proveniente dos cálculos considerando três e treze painéis solares, respectivamente, pode contribuir com parte expressiva da demanda energética da granja e representa o melhor custo-benefício para o aumento da sustentabilidade energética da suinocultura.

A proposta do sistema de aquecimento se mostrou vantajosa do ponto de vista energético, uma vez que o estudo teórico da geração de metano e de energia indicou que 68,9% e 78,6% da demanda energética da granja poderia ser suprida quando o sistema atingisse a temperatura de 30°C, nos respectivos períodos quente e frio.

Desse modo, a temperatura de 30°C pode ser considerada adequada para otimizar o processo anaeróbio em função das condições propícias para a atividade microbológica, assim como favorecer o suprimento de energia demandado pela granja de suinocultura.

Mesmo com as variações ao longo do dia, o sistema atinge as temperaturas desejadas para o aquecimento da biomassa e posterior disposição nos biodigestores.

Com o desenvolvimento deste trabalho, pôde-se perceber que a recuperação da energia solar pode contribuir para uma maior sustentabilidade energética dos sistemas agroindustriais de tratamento de efluentes.

REFERÊNCIAS

ANNEL. A produção de energia elétrica a partir da biomassa. *In: Atlas de Energia Elétrica no Brasil: Parte II: Fontes renováveis*. Agência Nacional de Energia Elétrica. Capítulo 4: Biomassa. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf. Acesso em: 19 maio 2020.

ANUKAM, A.; MOHAMMADI, A.; NAQVI, M.; GRANSTRÖM, K. A review of the chemistry of anaerobic digestion: Methods of accelerating and optimizing process efficiency. *Processes*, v. 504, n. 7, p 1-19, 2019.

APHA. **Standard Methods** for the examination of water and wastewater. 23. ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**: Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, p. 21, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15939: Sistemas de tubulações plásticas para instalações prediais de água quente e fria – Polietileno reticulado (PE-X)**. Parte 1: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, p. 53, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16866: Poliestireno expandido (EPS) – Determinação das propriedades – Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 21, 2020.

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

CAO, L., KEENER, H., HUANG, Z., LIU, Y., RUAN, R., XU, F. Effects of temperature and inoculation ratio on methane production and nutrient solubility of swine manure anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, v. 299, p. 1-32, 2020.

CECON, P. R.; SILVA, A. R. da; NASCIMENTO, M.; FERREIRA, A. **Métodos Estatísticos**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2012.

CETESB. **Manual do usuário do programa de computador Biogás**: geração e uso energético – efluente e resíduos rural – versão 1.0. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, p. 62, 2006.

CHAE, K. J; JANG, A. M; YIM, S.K.E.; KIM, I.S. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. **Bioresource Technology**, v.99, p.1-6, 2008.

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

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

CHENG, D. L.; WEI, D. Problematic effects of antibiotics on anaerobic treatment of swine wastewater. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 642-653, 2018.

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

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DE ALMEIDA, C.; BARICCATTI, R. A.; FRARE, L. M.; NOGUEIRA, C. E. C.; MONDARDO, A. A.; CONTINI, L.; GOMES, G. J.; ROVARIS, S. A.; SANTOS, K. G. dos; MARQUES, F. Analysis of the socio-economic feasibility of the implementation of an agro-energy condominium in western Paraná – Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 601–608, 2017.

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

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**, v. 57, p. 759-765, 2013.

EMBRAPA. **Os solos do Brasil**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 01 out. 2019.

ENERGY PLUS. **PDF Documentation**. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 15 maio 2020.

ENERGY PLUS. **Engineering Reference**. U.S. Department of Energy, p. 1–1767, 2021a.

ENERGY PLUS. **Input Output Reference**. U.S. Department of Energy, p. 1–2805, 2021b.

FABRIS, J. **A influência da temperatura do solo no desempenho térmico de construções que utilizam fundação em Radier**. 2017, 185f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós Graduação em Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

FEAM. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2019. Disponível em:

http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mapadosolo/mapa_solos_4.jpg. Acesso em: 01 out. 2019.

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; DE SOUZA, S. N. M.; DE SOUZA, S. S.; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440-455, 2018.

GOOGLE EARTH. **Mapas**. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 15 maio 2020.

GUNJO, D. G.; MAHANTA, P.; ROBI, P. S. CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition. **Renewable Energy**, v. 106, p. 24-36, 2017.

HASSANEIN, A. A.; QIU, L.; JUNTING, P.; YIHONG, G.; WITARSA, F.; HASSANAIN, A. A. Simulation and validation of a model for heating underground biogas digesters by solar energy. **Ecological Engineering**, v. 82, p. 336-344, 2015.

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.

INMET. **Dados meteorológicos**: Dados históricos anuais – Brasil. Instituto Nacional de Meteorologia. 2020a. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 15 maio 2020.

_____. **Dados meteorológicos**: Dados históricos anuais – Minas Gerais. Instituto Nacional de Meteorologia. 2020b. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 15 maio 2020.

KHALIL, M.; BERAWI, M. A.; HERYANTO, R.; RIZALIE, A. Waste to energy technology: The potential of sustainable biogas production from animal waste in Indonesia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, p. 323–331, 2019.

KOCAR, G.; ERYASAR, A. An application of solar energy storage in the gas: Solar heated biogas plants. **Energy Sources**, v. 29, p. 1513-1520, 2007.

KUNDU, K.; SHARMA, S.; SREEKRISHNAN, T. R. Influence of process parameters on anaerobic digestion microbiome in bioenergy production: towards an improved understanding. **Bioenergy Research**, v. 10, p. 288–303, 2017.

LATECAE. **Dados climáticos complementares de Viçosa para o EnergyPlus**. Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética. Disponível em: <http://www.latecae.ufv.br/en-US/downloads>. Acesso em: 15 maio 2020.

LIU, Y.; CHEN, Y.; LI, T.; WANG, D.; WANG, D. Investigation on the heat loss characteristic of underground household biogas digester using dynamic simulations and experiments. **Biosystems Engineering**, v. 163, p. 116-133, 2017.

LOPES, J. O. **Modelagem da produção de metano e do balanço energético em biodigestores modelo lagoa coberta**. 2020, 77f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambientais) – Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

MARIANI, L. **Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil**. 2018, 144f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

MEISTER, M.; REZAVAND, M.; EBNER, C.; PÜMPEL, T.; RAUCH, W. Mixing non-Newtonian flows in anaerobic digesters by impellers and pumped recirculation. **Advances in Engineering Software**, v. 115, p. 194-203, 2017.

NASCIMENTO, L. A.; OLIVEIRA, R. R. M.; SOUSA, I. P.; MARADINI, P. S.; ROSA, A. P. Insights to improve covered lagoon biodigesters through by-products recovery in pig farms. **Environmental Research and Technology**, v. 4, p. 284-292, 2021.

NÁTHIA-NEVES, G.; BERNI, M.; DRAGONE, G.; MUSSATO, S. I.; FORSTER-CARNEIRO, T. Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 15, p. 2033-2046, 2018.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed., Oxfordshire: Taylor & Francis e-Library, 2002.

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

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed., São José dos Campos: INPE, 2017.

RESENDE, B. C. **Influência do solo no desempenho térmico de habitações com cômodos subterrâneos**. 2017, 246f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

RIGO, M.; CONCEIÇÃO, W. A. S.; COUTINO, M. R. Uso do método de diferenças finitas na solução da equação de calor usando o programa Excel. *In: IV Congresso Sul Brasileiro de Engenharia de Alimentos e VII Encontro Paranaense de Engenharia de Alimentos*, 2018, Guarapuava. **Anais...** Unicentro/UFFS, 2018.

ROSA, A. P.; LOBATO, L. C. S.; BORGES, J. M.; MELO, G. C. B.; CHERNICHARO, C. A. L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 315-328, 2016.

SCHLECHT, M.; MEYER, R. Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems. *In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. Concentrating solar power technology*. Cambridge: Woodhead, Cap. 4. 2012.

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**, Edição Especial, p. 33-41, 2015.

SOUSA, I. P. **Estudo do potencial energético e das variáveis do processo em biodigestores anaeróbios modelo lagoa coberta**. 2019, 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

SOUZA, C. F.; LUCAS JÚNIOR, J. D.; FERREIRA, W. P. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato: considerações sobre a partida. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 530-539, 2005.

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

SOUZA, J. C. P.; OLIVEIRA, P. A. V.; TAVARES, J. M.; ZANUZZI, C. M.; TREMEA, S. L.; PIEKAS, F.; ZIMMERMANN, L. A. **Gestão da Água na Suinocultura**. 1. ed. Concórdia: Embrapa, 2016.

TIMOSHENKO, S. **Resistência dos Materiais**. 3. ed., Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1966.

VAZ, P. N. **Simulação de biodigestor de fluxo tubular com e sem sistemas de agitação e aquecimento**. 2019, 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

VAZ, P. N.; OLIVEIRA FILHO, D.; MARTINS, M. A.; CARLO, J. C.; ROSA, A. P.; MENDES, E. M. A. M. Computational fluid dynamics simulation of thermodynamic behaviour of tubular digester. **IFAC PapersOnLine**, v. 53, p. 15829-15834, 2020.

WEG. **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-Geradores/Industrial/GTA202AI36-IP21-B15T-SAE-2-SAE-11%2C5/p/14408165>. Acesso em: 20 out. 2020.

XING, L. U. **Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling**. 2014, 406f. Thesis (Doctorate in Philosophy), Oklahoma State University, Stillwater, 2014.

CAPÍTULO 3: ESTUDO DAS TROCAS TÉRMICAS INTERNAS E EXTERNAS EM UM BIODIGESTOR MODELO LAGOA COBERTA COM EFLUENTE AQUECIDO

3.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o emprego de biodigestores do tipo lagoa coberta (BLC) para o tratamento de efluentes agroindustriais tem crescido principalmente devido à baixa demanda tecnológica desses reatores e por se enquadrarem dentro das condições de investimento dos grandes, médios e pequenos produtores (FERNANDES e MARIANI, 2019). Além disso, o aumento das exigências legais no que tange o tratamento e disposição de resíduos também contribui com a escolha de unidades que apresentem uma boa eficiência e um menor custo de implantação e manutenção (DOS SANTOS *et al.*, 2020). Desse modo, muitas pesquisas têm surgido no sentido de compreender e otimizar os processos que ocorrem no interior desses reatores.

Os biodigestores são câmaras hermeticamente fechadas e a estabilização da matéria orgânica ocorre mediante condições anaeróbias, ou seja, na ausência de oxigênio (COELHO *et al.*, 2018). A digestão anaeróbia é um conjunto de reações químicas e biológicas que ocorrem de forma interdependente e sequencial, a saber: (i) hidrólise; (ii) acidogênese; (iii) acetogênese; e (iv) metanogênese (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005). Na hidrólise, compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) são convertidos em compostos orgânicos solúveis mais simples (monossacarídeos, aminoácidos e ácidos graxos) por meio da ação de microrganismos fermentativos. A segunda etapa se caracteriza pela fermentação dos monômeros solúveis em etanol, ácidos orgânicos voláteis e de cadeia longa, acetato, hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂) e amônia (NH₃). Na acetogênese os ácidos graxos são convertidos em H₂, CO₂ e acetato por organismos produtores de hidrogênio. Na última etapa, arqueias metanogênicas consomem o hidrogênio e o acetato e produzem metano e dióxido de carbono (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005; VÖGELI *et al.*, 2014).

A velocidade e a eficiência do processo anaeróbio podem ser influenciadas por diferentes fatores, dentre os quais destacam-se: taxa de matéria orgânica, homogeneização da biomassa, controle de temperatura, pH, sólidos totais, nutrientes e tempo de retenção hidráulica (MEEGODA *et al.*, 2018; SCHNURER; BOHN; MOESTEDT, 2016). Dentre os parâmetros citados, a temperatura é considerada a variável mais crítica do ponto de vista operacional dos biodigestores, uma vez que tem efeito direto na atividade microbológica que ocorre no interior dos reatores (ADROVER *et al.*, 2020).

Segundo Deng *et al.* (2016), a digestão anaeróbia sob condições mesofílicas (temperaturas internas entre 30 e 35°C) influencia na viabilidade econômica do emprego de biodigestores para a degradabilidade da matéria orgânica complexa. Entretanto, a maior parte dos sistemas em escala plena são operados à temperatura ambiente, comprometendo a eficiência do tratamento e a produção de biogás. Além disso, o monitoramento desses reatores ocorre apenas em termos de temperatura na entrada e saída, de forma a não considerar as trocas térmicas que acontecem entre o biodigestor e o ambiente externo.

O calor pode ser transferido por meio de três mecanismos: radiação térmica, condução e convecção (INCROPERA *et al.*, 2008). A radiação térmica se caracteriza como sendo a emissão de calor de uma substância na forma de ondas eletromagnéticas, devido as variações das configurações eletrônicas dos átomos que compõem essa substância, de modo que todos os corpos a uma temperatura acima do zero absoluto emitem radiação térmica. A condução é a transferência de calor de partículas mais energéticas para partículas adjacentes menos energéticas e pode ocorrer nos estados sólido, líquido ou gasoso. A convecção é o mecanismo de troca térmica de uma superfície sólida para um fluido (líquido ou gás) em movimento e adjacente a essa superfície (ÇENGEL e BOLES, 2013; INCROPERA *et al.*, 2008).

Os biodigestores modelo lagoa coberta são lagoas escavadas no solo e apresentam uma geometria retangular na base e seção trapezoidal com inclinação variável de acordo com o talude e as características do solo (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). A parte inferior do reator é isolada do solo por meio de um material geossintético, como o policloreto de vinila (PVC) ou o polietileno de alta densidade (PEAD), com espessura de 0,8 mm a 1,0 mm, normalmente de coloração escura e baixa permeabilidade a fluídos, a fim de evitar infiltrações e contaminações do solo e do lençol freático (SILVA, 2016). A região superior, por sua vez, é normalmente coberta com uma manta flexível de PEAD, formando a cúpula, de 0,8 mm a 2,0 mm de espessura, podendo se apresentar nas cores preta ou branca e suficientemente flexível para acumular o biogás (SILVA, 2016). A cúpula do reator recebe radiação solar direta, de modo que as mantas de PEAD devem possuir um tratamento químico a fim de garantir uma alta capacidade de preservação de suas características físicas e mecânicas (COELHO e LAVOIE, 2017).

Desse modo, por se tratar de um modelo semienterrado e com exposição direta aos raios ultravioletas, a análise do comportamento da temperatura e das trocas térmicas entre o biodigestor e o meio que o circunda é de grande relevância, uma vez que permite um estudo mais aprofundado de todas as interações que ocorrem dentro e fora do sistema. Entretanto, são

muitas as variáveis a serem consideradas nesse tipo de estudo, de modo que a utilização de ferramentas computacionais se faz viável e necessária. Dessa forma é possível obter condições de funcionamento dos sistemas que resultem em um maior aproveitamento da radiação solar, menores perdas de calor para o ambiente externo, maior taxa de atividade microbiana e otimização do tratamento.

Vaz (2019) e Lopes (2020) estudaram as trocas térmicas que ocorrem em um biodigestor modelo lagoa coberta localizado em uma suinocultura no município de Teixeira, MG, por meio do emprego do programa *Energy Plus*. Entretanto, na simulação de Vaz (2019), o ambiente interno do biodigestor foi considerado como uma única zona térmica, de modo que a temperatura interna obtida era uma média das temperaturas do biogás (fase gasosa) e da biomassa residente (fase líquida). Lopes (2020), por sua vez, comparou dois cenários, a saber: (i) ambiente interno composto por uma única zona térmica; e (ii) ambiente interno composto por duas zonas térmicas. O cenário (ii) apresentou um resultado mais próximo dos valores mensurados reais, uma vez que a biomassa e o biogás apresentam propriedades térmicas distintas e devem ser modelados separadamente (LOPES, 2020).

A análise de trocas térmicas com efluente aquecido em reatores anaeróbios é uma abordagem pioneira e pode trazer discussões interessantes no âmbito de aspectos operacionais e construtivos dos biodigestores modelo lagoa coberta. Estudos apontam que o aquecimento do efluente no interior dos biodigestores pode elevar a produção de biogás, bem como reduzir o tempo de retenção hidráulica (TRH), eliminar patógenos e garantir a estabilidade da produção de biogás durante o ano (MAKAMURE; MUKUMBA; MAKAKA, 2021). Desse modo, estudar as transferências de calor entre os componentes internos e externos aos biodigestores, considerando a biomassa aquecida, permite avaliar se a biomassa é capaz de manter a temperatura ao longo do dia e quantificar as taxas de ganho e perda de energia entre a biomassa aquecida, o biogás, o solo e o ambiente externo.

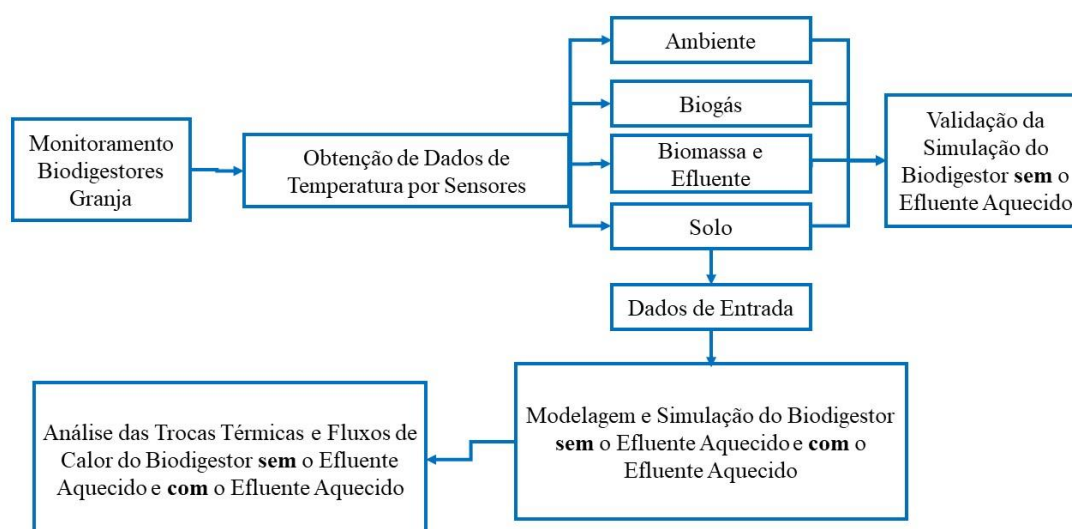
Neste trabalho teve-se como objetivo comparar as trocas térmicas que ocorrem nos ambientes interno e externo de um biodigestor modelo lagoa coberta a partir do efluente aquecido e sem aquecimento.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção foram indicados e descritos os procedimentos empregados no modelo dos biodigestores a partir do efluente sem aquecimento e com aquecimento, proveniente do sistema de aquecimento apresentado no Capítulo 2. Como trata-se de um projeto combinado, alguns

elementos empregados no modelo do sistema de aquecimento foram os mesmos empregados no modelo do biodigestor, de modo a estarem referenciados no texto, a fim de evitar repetição das informações. Os resultados do monitoramento das temperaturas dos ambientes internos e externos aos biodigestores descritos no Capítulo 2 foram utilizados como dados de entrada do modelo e validação da simulação do biodigestor sem o efluente aquecido. Ainda, foram estudadas as trocas térmicas e as taxas de transferência de calor entre o biodigestor sem o efluente aquecido e com o efluente aquecido e o ambiente externo. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma da metodologia empregada nesse capítulo.

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia empregada nesse estudo



Fonte: A autora

3.2.1 Modelo do biodigestor

O modelo do biodigestor foi realizado utilizando as informações relativas à localização, materiais construtivos, dimensões e dados de monitoramento dos biodigestores descritas nos itens 2.2.1 e 2.2.2 desse trabalho. A proposta apresentada no capítulo 2 indica que o efluente da suinocultura aquecido (item 2.2.3) é direcionado para os BLC, onde espera-se uma melhor condição operacional decorrente do acréscimo da temperatura.

O estudo foi conduzido por meio do emprego dos programas de modelagem matemática apresentados no item 2.2.3, a saber: *SketchUp* (versão 17.2) para a construção do modelo do biodigestor; *Energy Plus Building* (versão 8.7) para a simulação e *plugin Legacy Open Studio* para a geometria do modelo (ENERGY PLUS, 2020). Os dados de entrada para a simulação do biodigestor foram: (i) arquivo climático e localização do estudo; (ii) dados de temperatura do

solo; (iii) propriedades físicas e térmicas do solo, da biomassa residente e dos materiais que compõem o biodigestor; e (iv) período de execução da simulação.

O arquivo climático empregado no modelo foi o mesmo adotado no modelo do sistema de aquecimento, uma vez que ambas as estruturas estão localizadas no mesmo local (item 2.2.3.1). Os dados de temperatura do solo foram obtidos por meio dos sensores de monitoramento instalados na estação de tratamento de efluentes da granja (item 2.2.2). Para tanto, considerou-se a média dos valores mensurados nos dois períodos de execução da simulação, a saber: (i) período quente (jan., fev. e mar./2018 e 2019) e (ii) período frio (jun., jul. e ago./2018 e 2019).

A Tabela 3.1 apresenta as características e propriedades físicas e térmicas dos materiais construtivos do biodigestor. No *Energy Plus*, cada ambiente interno é considerado como sendo uma zona térmica homogênea. Nesse estudo foram consideradas duas zonas térmicas, uma relativa ao biogás e outra relativa à biomassa residente, uma vez que essa configuração propicia uma avaliação detalhada e específica das temperaturas e trocas térmicas dos dois componentes separadamente (LOPES, 2020). As características e propriedades físicas e térmicas do solo e da biomassa foram detalhadas na Tabela 2.2 (Capítulo 2). Para a superfície de separação entre a zona do biogás e a zona da biomassa residente foram adotadas as mesmas propriedades termo físicas atribuídas à biomassa residente (Tabela 2.2 do Capítulo 2).

Tabela 3.1 – Características e propriedades físicas e térmicas dos materiais construtivos do biodigestor

Sistema / Componente	Materiais	Dimensões e Características	Propriedades Físicas	Valores	Referências
Biodigestor (manta inferior)	PEAD	Médio (rugosidade) 0,00125 m (espessura)	Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1700	-
			Condutividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0,35	DIN 52612 – 2
			Massa Específica (kg m^{-3})	950	ASTM D792 – 13
Biodigestor (manta superior)	PEAD	Médio (rugosidade) 0,00100 m (espessura)	Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1700	-
			Condutividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0,35	DIN 52612 – 2
			Massa Específica (kg m^{-3})	950	ASTM D792 – 13

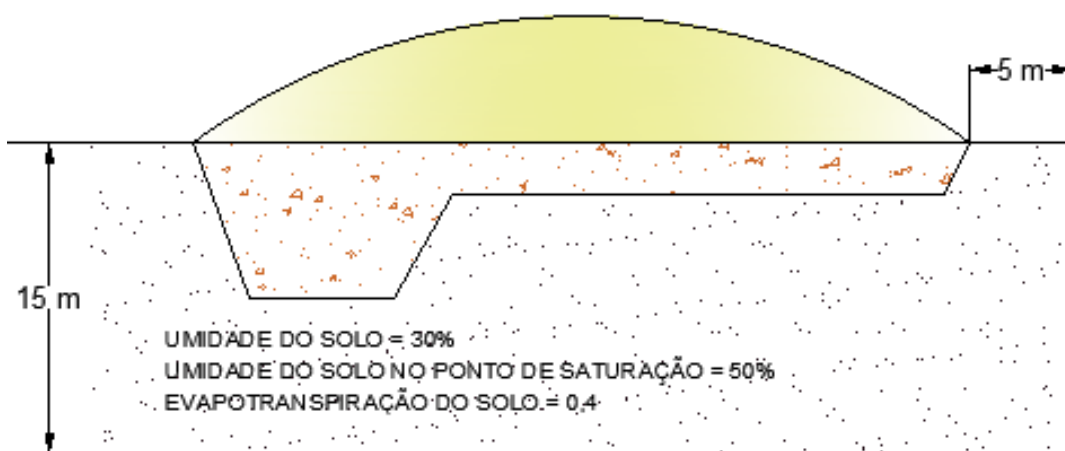
A massa correspondente ao biogás não foi modelada no *Energy Plus*, devido às limitações do programa e por apresentar propriedades termo físicas similares ao ar. Além disso, o biogás tem baixa inércia térmica, não contribuindo expressivamente com as variações térmicas no interior do biodigestor.

O método numérico de Xing (2014) foi selecionado para avaliar as trocas térmicas entre a biomassa residente e o solo ao redor do biodigestor. O modelo é baseado na formulação de diferenças finitas considerando cinco parâmetros: a temperatura média anual do solo, duas amplitudes de temperatura do solo na superfície e um atraso de fase para prever as temperaturas não perturbadas do solo (RESENDE, 2017; XING, 2014). Além disso, os dados meteorológicos fornecidos pelo arquivo climático do local foram empregados para obter as condições de contorno da superfície (RESENDE, 2017).

As propriedades termo físicas do solo foram adotadas considerando dois cenários, a saber: (i) solo saturado para o período quente; e (ii) solo seco para o período frio. Os dados de entrada relativos à temperatura do solo empregados no modelo foram especificados no item 2.2.3 (Capítulo 2).

Em relação à análise de transferência de calor entre o solo e cada aresta do biodigestor foi considerada uma região de influência do solo com uma profundidade de 15 m, um perímetro de 5 m, uma relação largura com a altura de 3, umidade do solo de 30% e umidade do solo de 50% no ponto de saturação (Figura 3.2). Os valores de profundidade e perímetro considerados foram obtidos por meio do método de diferenças finitas (item 2.2.3.3 do Capítulo 2). A evapotranspiração, que consiste na perda de umidade do solo, foi considerada como 0,4. O solo foi caracterizado como argiloso vermelho-amarelo distrófico (LVAd29), segundo o Mapa de Solos do Brasil e do estado de Minas Gerais (EMBRAPA, 2011; FEAM, 2019).

Figura 3.2 – Representação do domínio do solo ao redor do biodigestor



Fonte: A autora

As propriedades físicas da biomassa residente foram as mesmas assumidas no item 2.2.3 e apresentadas na Tabela 2.2 (Capítulo 2), exceto a área útil ocupada pela biomassa que foi calculada dividindo o volume total do biodigestor ($V_b = 1250 \text{ m}^3$) pela espessura da biomassa ($e = 0,8 \text{ m}$), obtendo um valor de $A_u = 1562,5 \text{ m}^2$. Além disso, para a análise das trocas térmicas foi considerado o efluente sem aquecimento e o efluente aquecido na temperatura de 30°C , uma vez que esse valor foi considerado como a temperatura ideal de operação dos biodigestores obtida no Capítulo 2 (item 2.3.3).

Desse modo, para o modelo do aquecimento interno da biomassa residente até atingir a temperatura desejada foi considerada a existência de uma fonte de aquecimento no interior do reator. O aumento da temperatura da massa interna ocorreu mediante o aumento da potência dessa fonte de aquecimento, considerando o período diurno em que o biodigestor recebe o efluente aquecido proveniente do tanque de equalização e o período noturno em que não há o lançamento de efluente aquecido no reator (item 2.2.3 do Capítulo 2). Para obter a temperatura de 30°C nos dois períodos de execução da simulação foi inserida no modelo uma fonte de aquecimento com potência de 19.900 W .

O modelo permitiu analisar o comportamento das temperaturas do ambiente, biogás, biomassa e solo para os meses com maior incidência de radiação solar (período quente) e os meses com menor incidência de radiação solar (período frio), considerando dois cenários, a saber: (i) sem aquecimento e (ii) com aquecimento. Além disso, foi possível quantificar as taxas de transferência de calor entre os componentes internos e externos ao biodigestor, comparando-se os dois cenários nos períodos quente e frio (item 3.2.2).

As variáveis de saída para as temperaturas dos respectivos componentes foram: (i) *zone outdoor air drybulb temperature*, que se caracteriza como a temperatura de bulbo seco do ar externo ($^{\circ}\text{C}$) e é calculada pelo programa na altura acima do solo do centroide da zona; (ii) *zone mean air temperature*, que representa a temperatura média no interior do biodigestor ($^{\circ}\text{C}$) para as zonas do biogás e da biomassa; e (iii) *zone domain basement floor interface temperature* e *zone domain basement wall interface temperature*, que fazem parte do objeto *SurfaceProperty:OtherSideConditionsModel* e representam, respectivamente, a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) fornecida às superfícies da base e das laterais do tanque considerando as condições de domínio do solo (ENERGY PLUS, 2021). Nesse caso foi utilizada a média dos valores obtidos como dado de temperatura do solo.

Para as análises de troca de calor foram consideradas as trocas por radiação, convecção e condução. As variáveis de saída para a radiação foram: *surface outside face solar radiation heat gain rate per area*; *surface outside face net thermal radiation heat gain rate per area*; e *surface inside face net surface thermal radiation heat gain rate per area*. A primeira representa o calor obtido por radiação solar direta na face externa da manta superior do biodigestor e possui valores sempre positivos, em Watt por m^2 (W m^{-2}). A segunda representa o calor proveniente da radiação térmica infravermelha de onda longa que é transferido entre o ambiente e o biogás, com valores positivos (W m^{-2}) indicando que o calor está sendo adicionado ao ambiente por radiação térmica. A terceira representa o calor proveniente da radiação térmica infravermelha de onda longa que é transferido entre o biogás e a biomassa e entre a biomassa e o solo, com valores positivos (W m^{-2}) indicando que o calor está sendo adicionado, respectivamente, à biomassa e ao solo por radiação térmica (ENERGY PLUS, 2021).

As variáveis de saída para a convecção foram: *surface outside face convection heat gain rate per area* e *surface inside face convection heat gain rate per area*. A primeira descreve o calor obtido por convecção entre o ambiente externo e a face externa da manta superior do biodigestor, sendo que valores positivos (W m^{-2}) indicam que o calor é adicionado à manta. A segunda, por sua vez, descreve o calor obtido por convecção entre a face interna da manta superior do biodigestor e o ar da zona (biogás), sendo que valores positivos (W m^{-2}) indicam que o calor é adicionado à manta. Também foi empregada a mesma variável para descrever a transferência de calor por convecção entre o biogás e a biomassa, sendo que valores positivos (W m^{-2}) indicam que o calor é adicionado à biomassa (ENERGY PLUS, 2021).

Em relação à condução, foi empregada a variável de saída *surface average face conduction heat transfer rate per area*, que representa a média das taxas de calor transferidas

por condução da face interna para a externa e vice-versa, de modo a descrever a troca de calor entre dois ambientes de forma nominal. Nesse caso, valores positivos (W m^{-2}), indicam calor fluindo para a zona térmica/interior do biodigestor (ENERGY PLUS, 2021).

A validação da simulação do biodigestor sem o efluente aquecido foi desenvolvida e descrita por Lopes (2020). A autora realizou uma análise estatística comparando os dados obtidos na simulação com os dados do monitoramento das temperaturas em escala real (item 2.2.2 do Capítulo 2). Os parâmetros validados foram as temperaturas do ambiente, da biomassa, do biogás e do solo. A raiz do erro quadrático médio (REQM) e a raiz do erro quadrático médio relativo (REQMR) foram adotados como indicadores de desempenho (Equações 2.1 e 2.2 do Capítulo 2).

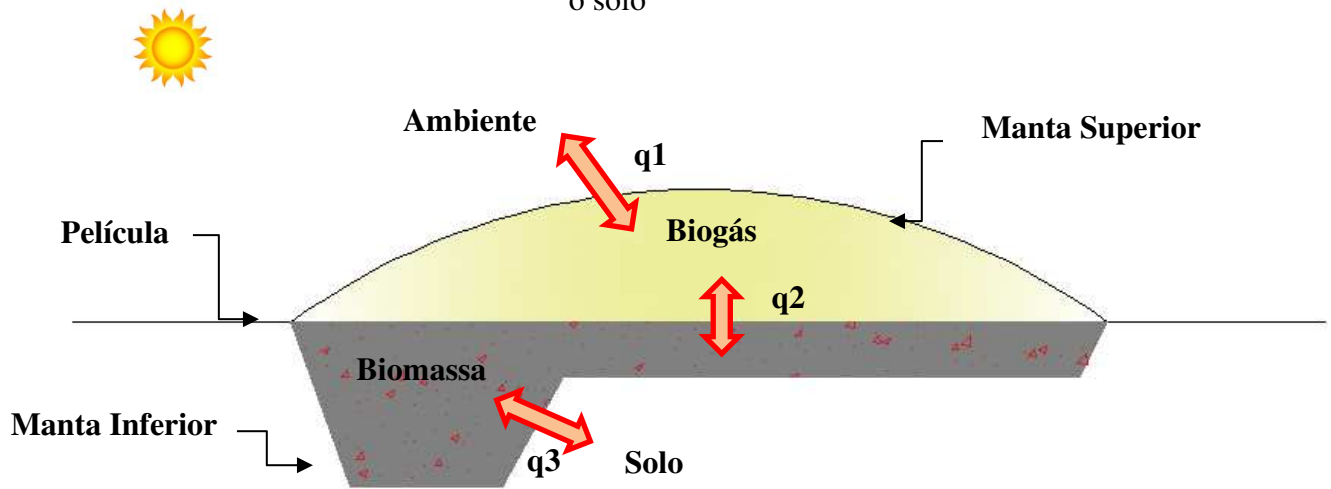
No trabalho de Lopes (2020), a autora comparou e validou dois cenários, sendo um cenário considerando o ambiente interno do biodigestor como uma única zona térmica, de modo que os valores obtidos na simulação em relação a temperatura interna representavam uma média entre as temperaturas do biogás e da biomassa residente. O outro cenário estudado foi separando cada componente como uma zona térmica, a fim de que fosse possível analisar as temperaturas do biogás e da biomassa separadamente.

A validação comprovou que o segundo cenário foi mais fidedigno em relação aos dados reais mensurados, principalmente no período de inverno, com o menor valor de REQMR de 1,05% para a temperatura de solo e com o maior valor de REQMR de 34,0% no período de verão com uma zona térmica. Desse modo, nesse trabalho foi escolhido o cenário multifásico para apresentar os resultados da validação e fazer a análise das trocas térmicas entre os ambientes interno e externo ao biodigestor.

3.2.2 Balanço de energia

A avaliação das trocas térmicas entre o biodigestor e o meio circunvizinho foi realizada por meio da análise do fluxo de calor (q) entre o ambiente externo e a manta plástica superior e o biogás (q_1), entre o biogás e a biomassa residente (q_2), e entre a biomassa e o solo (q_3), como representado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Representação das trocas térmicas entre o biodigestor, o meio ambiente externo e o solo



Fonte: A autora

Na Tabela 3.2 apresentam-se as principais transferências de calor que ocorrem entre as unidades componentes dos meios interno e externo ao biodigestor, considerando dois cenários: (i) realidade e (ii) simulação, uma vez que certas premissas foram adotadas na simulação, afetando o tipo de troca térmica existente. A principal diferença se dá pelo fato de que, no modelo, a biomassa foi admitida como sendo uma massa interna uniforme e sem gradiente de temperatura (item 2.2.3 do Capítulo 2), ao passo que, na realidade, trata-se de um fluido em estado líquido.

Tabela 3.2 – Trocas térmicas entre as unidades componentes dos meios externos e internos ao biodigestor

Unidades Componentes	Trocas	
	Realidade	Simulação
Ambiente - Manta Superior	Radiação + Convecção	Radiação + Convecção (q_1)
Ambiente - Biogás	Radiação / Difração	Radiação térmica (q_1)
Manta superior - Biogás	Radiação + Convecção	Convecção (q_1)
Biogás - Biomassa	Convecção	Convecção (Desconsiderado)
Biogás - Película	Não existe película de separação	Convecção (Desconsiderado)
Película - Biomassa	Não existe película de separação	Condução (Desconsiderado)

Tabela 3.2 – Trocas térmicas entre as unidades componentes dos meios externos e internos ao biodigestor (continuação)

Unidades Componentes	Trocas	
	Realidade	Simulação
Biogás - Biomassa	Convecção	Convecção + Radiação (q_2)
Biomassa - Biomassa	Convecção	Condução (Desconsiderado)
Biomassa - Manta Inferior	Convecção	Convecção + Radiação (Desconsiderado)
Manta inferior - Solo	Condução	Condução (Desconsiderado)
Biomassa - Solo	Convecção	Condução + Radiação (q_3)

As principais formas de transferência de calor entre o ambiente externo e o biodigestor são a radiação solar e a convecção (q_1), enquanto a troca de energia entre o solo e a biomassa no reator se dá majoritariamente por convecção (realidade) ou condução (simulação) e radiação térmica (q_3). O biogás e a biomassa residente trocam calor por convecção e radiação térmica (q_2). Nesse estudo, não foram consideradas as trocas de calor entre o biogás e biogás e entre a biomassa e a biomassa por terem sido considerados materiais com características térmicas homogêneas (itens 2.2.3 do Capítulo 2 e 3.2.1).

A manta superior do biodigestor é aquecida principalmente por meio da radiação solar incidente. Entretanto, também ocorrem trocas de calor entre a manta e o ar externo por convecção, uma vez que a temperatura do ar varia temporalmente dentro do domínio e, portanto, foi incluída na simulação. A manta então troca calor com o biogás no interior do reator por convecção. Além disso, parte da radiação solar que incide na cúpula sofre difração e atinge o biogás, aquecendo-o.

Nesse estudo, foi admitida a troca de calor direta entre o biogás e a biomassa por convecção e radiação térmica, mesmo com a presença de uma superfície de separação entre as duas zonas (item 3.2.1 do Capítulo 2). Essa simplificação foi feita respeitando a lei zero da termodinâmica que estabelece: “se dois corpos A e B estão separadamente em equilíbrio térmico com um terceiro corpo C, então A e B estão em equilíbrio térmico entre si” (FOWLER, 1931). Desse modo, uma vez que foram adotadas as mesmas propriedades termo físicas da superfície de separação e da biomassa, as premissas consideradas são atendidas.

Além disso, ocorre a troca de calor entre a biomassa e o solo por condução (considerando a simulação) e radiação térmica e, novamente, foram desconsideradas as trocas de energia com a superfície intermediária, uma vez que se trata de uma manta de pequena espessura. Além

disso, as trocas de calor entre o ambiente externo e o solo por radiação solar e convecção são determinadas pelo modelo de Xing (2014) empregado no modelo do solo (item 3.2.1), assim os valores já estão embutidos nos resultados de troca de calor entre o solo e a biomassa.

No que se refere a radiação solar incidente na manta superior do biodigestor, o programa considera a radiação direta, a radiação difusa e a radiação refletida pela superfície terrestre. A radiação direta é a energia recebida diretamente do sol; a radiação difusa se caracteriza como a radiação solar recebida indiretamente, resultante da difração das nuvens e partículas presentes na atmosfera; e, por fim, a radiação refletida é a parcela de ondas curtas proveniente da reflexão de objetos circundantes como o solo (ÇENGEL e BOLES, 2013). Desse modo, a radiação global é obtida pelo somatório das radiações direta e difusa, sendo que a refletida é uma parcela da direta e difusa incidente em outros pontos, de modo a estar embutida no somatório da radiação global.

A taxa de transferência de calor emitida pela radiação solar na manta superior do biodigestor (q_t) foi obtida por meio da modelagem matemática no *Energy Plus*, que multiplica o somatório da radiação solar incidente horária (q_i) pela área da superfície da manta ($A_m = 532,91 \text{ m}^2$). O cálculo da área da manta foi obtido pela geometria do biodigestor elaborada no software *SketchUp* (versão 17.2). A taxa de transferência média ($q_{tm\acute{e}dia}$) se caracteriza como a razão de Q_t pelo número de dias da simulação ($d = 90$ dias para o período quente e 92 dias para o período frio) e pelo número de horas de insolação ($t_i = 13$ horas no período quente e $t_i = 11$ horas no período frio).

A troca de calor por radiação térmica entre as substâncias internas e externas ao biodigestor é obtida considerando a temperatura do ar, que varia espacialmente dentro do domínio do modelo, e as diferentes temperaturas das superfícies que trocam calor dentro do mesmo domínio.

Para o cálculo da taxa de transferência de calor por convecção, por sua vez, o *Energy Plus* utiliza a Lei de Resfriamento de Newton, que depende do coeficiente de convecção da superfície estudada, da área e da temperatura dessa superfície e da temperatura do ar ambiente ou da zona. O coeficiente de convecção foi determinado pelo método Programa de Pesquisa em Análise Térmica (TARP), que é o método padrão utilizado pelo programa (VAZ, 2019).

A troca de calor por condução foi modelada no *Energy Plus* empregando séries temporais básicas. Assim, para definir a taxa de transferência de calor em um elemento o programa relaciona o fluxo de energia de uma superfície desse elemento a uma série infinita, de modo a descrever o comportamento da temperatura nas superfícies interna e externa do elemento.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Validação da simulação

Na Tabela 3.3 apresentam-se os resultados dos indicadores de desempenho das temperaturas ambiente, biogás, biomassa e solo obtidas pelo modelo, considerando o cenário sem aquecimento, e comparando com as temperaturas aferidas pelos sensores instalados na unidade de tratamento de dejetos da granja (item 2.3.1). A avaliação foi realizada para os períodos quente e frio.

Tabela 3.3 – Indicadores de desempenho para diferentes perfis de temperatura considerando os períodos quente e frio

Temperatura / Período		Quente	Frio
Ambiente	REQM (°C)	4,1	1,8
	REQMR (%)	16,2	10,1
Biogás	REQM (°C)	8,1	4,2
	REQMR (%)	29,0	24,6
Biomassa residente	REQM (°C)	6,8	1,9
	REQMR (%)	25,7	9,0
Solo	REQM (°C)	7,3	0,2
	REQMR (%)	26,0	1,1

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

Analisando-se a Tabela 3.3 pode ser observado que, em geral, o período frio apresentou valores mais próximos entre os resultados da simulação e os dados obtidos no monitoramento, sendo a temperatura do solo no período frio a mais fidedigna (1,1%) e a temperatura do biogás no período quente a que mais se afastou dos valores reais (29,0%). Não houve muita homogeneidade em relação aos períodos quente e frio, sendo que os resultados referentes à biomassa residente e ao solo foram os que apresentaram maiores discrepâncias entre os períodos.

Além disso, é notável a diferença entre os resultados da validação referente à simulação do tanque de equalização (item 2.3.2) e à simulação do biodigestor, principalmente em relação à temperatura do solo nos períodos quente e frio. Desse modo, é necessário que seja feita uma nova análise de validação para melhorar a acurácia dos dados.

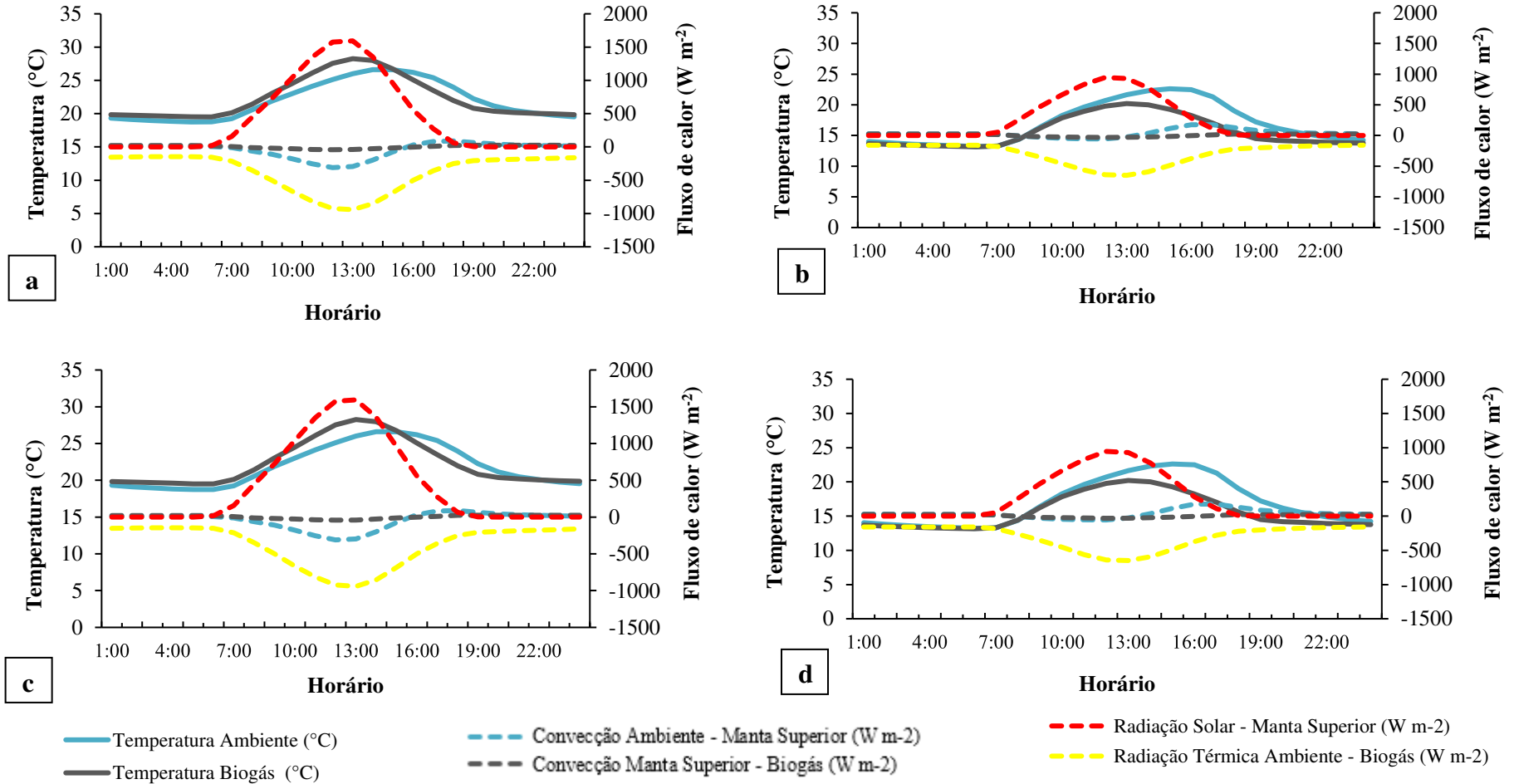
3.3.2 Balanço energético

A Figura 3.4 apresenta as variações das temperaturas médias do ambiente e do biogás obtidas por meio do modelo e simulação e o comportamento do fluxo de calor entre o ambiente e a manta superior do biodigestor (radiação solar e convecção), entre a manta superior e o biogás (convecção) e entre o ambiente e o biogás (radiação térmica), considerando médias horárias para os períodos quente (a) e frio (b) no cenário sem aquecimento e períodos quente (c) e frio (d) para o cenário com aquecimento.

Comparando os itens da Figura 3.4 é possível notar que o fluxo de calor não se alterou ao se avaliar as condições dos cenários com e sem aquecimentos nos respectivos períodos quente e frio. A manta superior é aquecida pela radiação solar direta das 06:00h até as 19:00h, com valor máximo de $1593,6 \text{ W m}^{-2}$ às 13:00h no período quente e das 07:00h às 18:00h, com valor máximo de $945,7 \text{ W m}^{-2}$ às 12:00h no período frio, tanto no cenário sem aquecimento, quanto no cenário com aquecimento. A taxa de transferência de calor no período quente, considerando o valor máximo, foi mais elevada em aproximadamente 41% em comparação com o período frio, uma vez que há uma maior incidência de radiação solar nos meses relativos ao período quente. Nos demais horários os valores deram zero indicando que não há incidência de radiação solar no biodigestor nos respectivos períodos quente e frio.

O ambiente ainda troca calor com a manta superior do biodigestor por convecção. Das 07:00 às 15:00h a manta perde calor para o ambiente (valores negativos), com valor máximo de aproximadamente $-310,1 \text{ W m}^{-2}$ às 12:00h e valor mínimo de $-11,1 \text{ W m}^{-2}$ às 07:00h no período quente. No período frio, a manta perde calor para o ambiente das 08:00 às 13:00h, com valor máximo de $-56,1 \text{ W m}^{-2}$ às 12:00h e valor mínimo de $-5,5 \text{ W m}^{-2}$ às 08:00h. Esse resultado é coerente, uma vez que devido à alta incidência da radiação solar na manta superior nesse mesmo período de tempo, a manta apresenta uma temperatura mais acentuada em relação ao ambiente externo, de modo a ceder calor para o ambiente e atingir o equilíbrio térmico. Ainda, a taxa de calor perdido por convecção da manta para o ambiente foi em torno de 20% e 6% do ganho de calor da manta proveniente da radiação solar direta, considerando os valores máximos nos períodos quente e frio, respectivamente.

Figura 3.4 – Variação das temperaturas do ambiente e do biogás e fluxo de calor (q_1), a partir de médias horárias, para os períodos quente (a) e frio (b) no cenário sem aquecimento e períodos quente (c) e frio (d) no cenário com aquecimento



Nos demais horários do dia, a manta superior recebe calor do ambiente (valores positivos), com valores máximos de aproximadamente $90,1 \text{ W m}^{-2}$ às 18:00h no período quente e $175,2 \text{ W m}^{-2}$ às 16:00h no período frio; e com valores mínimos de $5,5 \text{ W m}^{-2}$ às 06:00h no período quente e $17,1 \text{ W m}^{-2}$ às 07:00h no período frio. No período quente a taxa de transferência de calor do ambiente para a manta (valores positivos) é cerca de 29% do calor transferido da manta para o ambiente (valores negativos), considerando os valores máximos; ao passo que no período frio a taxa de transferência de calor da manta para o ambiente (valores negativos) é cerca de 32% do calor transferido do ambiente para a manta (valores positivos), considerando os valores máximos. Esse resultado comprova a baixa inércia térmica do material construtivo da manta superior, o que corrobora com as variações temporárias nas curvas. Além disso, o fato de que o ambiente ganha mais calor no período quente, ao passo que o ambiente perde mais calor no período frio coincide com o resultado da radiação, uma vez que no período quente a radiação incidente é mais elevada, fazendo com que a manta tenha que ceder calor para o ambiente para atingir o equilíbrio térmico. Essas relações e valores foram iguais para ambos os cenários estudados (com e sem aquecimento).

A manta superior também troca calor com o biogás por convecção. Das 08:00 às 16:00h a manta perde calor para o biogás (valores negativos), com valores máximos de aproximadamente $-41,6 \text{ W m}^{-2}$ às 12:00h no período quente e $-31,4 \text{ W m}^{-2}$ às 12:00h no período frio; e com valores mínimos de $-0,8 \text{ W m}^{-2}$ às 16:00h no período quente e -4 W m^{-2} às 16:00h no período frio. Nos demais horários do dia, a manta recebe calor do biogás (valores positivos), com valores máximos de aproximadamente $25,4 \text{ W m}^{-2}$ às 19:00h no período quente e $23,8 \text{ W m}^{-2}$ às 06:00h no período frio; e valores mínimos de $4,8 \text{ W m}^{-2}$ às 07:00h no período quente e $8,3 \text{ W m}^{-2}$ às 17:00h no período frio. Os valores pouco diferiram em relação aos períodos quente e frio, sendo que a taxa de transferência de calor do biogás para a manta superior foi de aproximadamente 61% e 76% do calor transferido da manta para o biogás nos períodos quente e frio, respectivamente, considerando-se os valores máximos. Essas relações e valores foram iguais para ambos os cenários estudados (com e sem aquecimento).

O biogás troca calor com o ambiente externo por radiação térmica. Nesse caso, todos os valores foram negativos indicando que o biogás recebe esse calor proveniente da radiação solar que é convertida em radiação térmica pela manta, com valores máximos de $-942,0 \text{ W m}^{-2}$ às 13:00h no período quente e $-648,8 \text{ W m}^{-2}$ às 13:00h no período frio; e com valores mínimos de $-146,6 \text{ W m}^{-2}$ às 05:00h no período quente e $-157,9 \text{ W m}^{-2}$ às 00:00h no período frio. As taxas de transferência de calor no período quente foram mais elevadas em aproximadamente 31% em

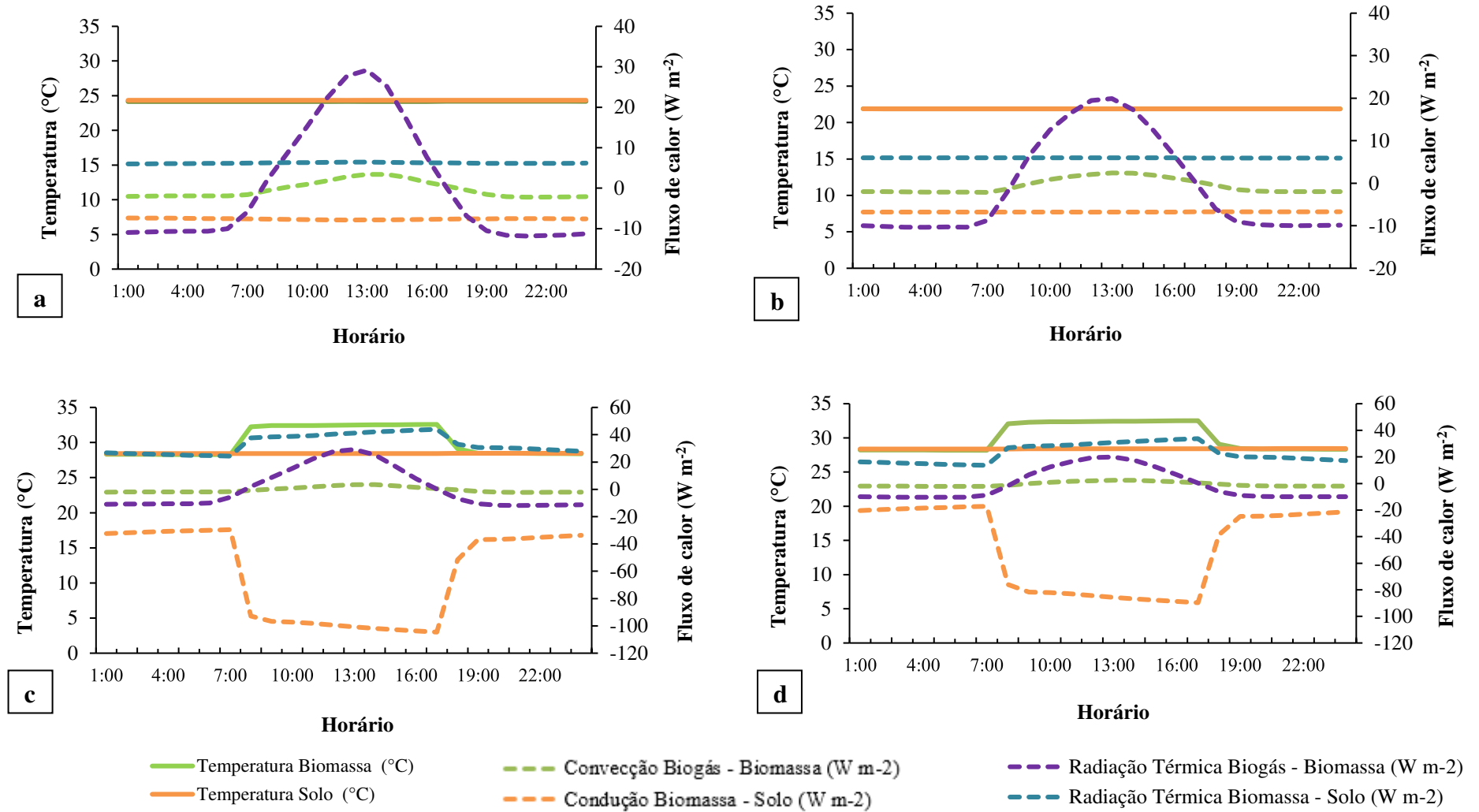
comparação com o período frio, uma vez que há uma maior incidência de radiação solar nos meses relativos ao período quente. Essas relações e valores foram iguais para ambos os cenários estudados (com e sem aquecimento).

As temperaturas referentes ao ar ambiente dos cenários com aquecimento e sem aquecimento mostraram valores muito similares com máxima de 26,6°C às 14:00h no período quente e 22,6°C às 15:00h no período frio; e temperatura mínima de 18,7°C às 05:00h no período quente e 13,2°C às 06:00h no período frio. Comportamento semelhante foi obtido considerando as temperaturas do biogás em ambos os cenários, com valores máximos de 28,3°C às 13:00h no período quente e 20,2°C às 13:00h no período frio; e temperatura mínima de 19,5°C às 06:00h no período quente e 13,2°C às 06:00h no período frio. As temperaturas do ambiente e, conseqüentemente, do biogás são fortemente influenciadas pelas condições climáticas as quais os biodigestores estão susceptíveis, de modo a apresentarem variações nas temperaturas ao longo do dia.

A Figura 3.5 apresenta os gráficos com as variações das temperaturas médias da biomassa residente e do solo obtidas por meio da modelagem matemática e simulação e o comportamento do fluxo de calor entre o biogás e a biomassa (convecção e radiação térmica) (q_2) e entre a biomassa e o solo (condução e radiação térmica) (q_3), considerando médias horárias para os períodos quente (a) e frio (b) no cenário sem aquecimento e períodos quente (c) e frio (d) para o cenário com aquecimento.

Os itens da Figura 3.5, no entanto, apresentaram comportamento diferente nos cenários com aquecimento e sem aquecimento, uma vez que as trocas de calor são mais potencializadas no cenário com aquecimento. É importante salientar que as faixas dos eixos que correspondem ao fluxo de calor têm limites máximos e mínimos diferentes para os dois cenários estudados na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Variação das temperaturas da biomassa e do solo e fluxos de calor (q_2 e q_3), a partir de médias horárias, para os períodos quente (a) e frio (b) no cenário sem aquecimento e períodos quente (c) e frio (d) no cenário com aquecimento



O biogás troca calor com a biomassa por convecção e por radiação térmica. No caso da convecção, o biogás perde calor para a biomassa (valores positivos) das 09:00h até as 17:00h, com valor máximo de $3,4 \text{ W m}^{-2}$ às 13:00h e mínimo de $0,2 \text{ W m}^{-2}$ às 09:00h no período quente. No período frio, o biogás perde calor para a biomassa das 10:00 às 17:00h, com valor máximo de $2,4 \text{ W m}^{-2}$ às 13:00h e mínimo de $0,5 \text{ W m}^{-2}$ às 17:00h. Nos demais horários do dia, o biogás recebe calor da biomassa (valores negativos), com valor máximo de $-2,2 \text{ W m}^{-2}$ às 22:00h e mínimo de $-0,5 \text{ W m}^{-2}$ às 18:00h no período quente; e valores máximos de $-2,1 \text{ W m}^{-2}$ às 07:00h e mínimo de $-0,1 \text{ W m}^{-2}$ às 09:00h no período frio. Os valores não diferiram muito em relação aos períodos quente e frio e a taxa de transferência de calor da biomassa para o biogás foi aproximadamente 65% e 88% do calor transferido do biogás para a biomassa nos períodos quente e frio, respectivamente, considerando os valores máximos. Desse modo, pode-se afirmar que existe um equilíbrio térmico entre esses dois componentes ao longo do dia, principalmente no período frio. Essas relações e valores foram iguais para ambos os cenários estudados (com e sem aquecimento).

Considerando as trocas por radiação térmica entre o biogás e a biomassa, o biogás cede calor para a biomassa (valores positivos) das 08:00 às 17:00h, com valor máximo de $29,9 \text{ W m}^{-2}$ às 13:00h e mínimo de $0,1 \text{ W m}^{-2}$ às 17:00h no período quente. No período frio, o biogás cede calor das 09:00 às 17:00h, com valor máximo de $19,9 \text{ W m}^{-2}$ às 13:00h e valor mínimo de $0,3 \text{ W m}^{-2}$ às 17:00h. Nos demais horários do dia o biogás recebe calor proveniente da biomassa (valores negativos), com valor máximo de $-11,8 \text{ W m}^{-2}$ às 21:00h e mínimo de $-5,8 \text{ W m}^{-2}$ às 07:00h no período quente; e valor máximo de $-10,4 \text{ W m}^{-2}$ às 04:00h e mínimo de $-1,7 \text{ W m}^{-2}$ às 08:00h no período frio. A taxa de transferência de calor da biomassa para o biogás foi aproximadamente 39% e 52% do calor transferido do biogás para a biomassa nos períodos quente e frio, respectivamente, considerando os valores máximos. Essas relações e valores foram iguais para ambos os cenários estudados (com e sem aquecimento).

As trocas por radiação térmica entre o biogás e a biomassa foram mais intensas do que as trocas por convecção. Além disso, é possível notar que as taxas de transferência de calor entre o ambiente, a manta superior e o biogás foram expressivamente maiores do que as trocas de calor entre o biogás e a biomassa. Esse resultado pode ser devido ao fato de que o biogás forma uma camada de material altamente isolante para transferência de calor e também em decorrência da grande capacidade térmica da biomassa e do alto tempo de resposta às variações das condições climáticas externas ao biodigestor (VAZ, 2019).

A biomassa, por sua vez, troca calor com o solo por condução e radiação térmica. No caso da condução todos os valores obtidos foram negativos, indicando que a biomassa perde calor para o solo, tanto no cenário com aquecimento quanto no cenário sem aquecimento, para os dois períodos estudados (período quente e período frio). No cenário sem aquecimento, os valores apresentaram pequenas variações ao longo do dia, com valor máximo de $-7,9 \text{ W m}^{-2}$ às 12:00h e mínimo de $-7,4 \text{ W m}^{-2}$ às 01:00h no período quente; e valor máximo de $-6,8 \text{ W m}^{-2}$ às 12:00h e mínimo de $-6,7 \text{ W m}^{-2}$ às 00:00h no período frio. No cenário com aquecimento, os resultados variaram de acordo com os períodos em que o efluente está mais aquecido, devido ao sistema de aquecimento ter sido programado para funcionar das 07:00 às 17:00h. No período quente, o valor máximo do fluxo de calor foi de $-104,6 \text{ W m}^{-2}$ às 17:00h e o valor mínimo foi de $-29,5 \text{ W m}^{-2}$ às 07:00h., enquanto no período frio, o máximo foi de $-89,7 \text{ W m}^{-2}$ às 17:00h e mínimo de $-17,2 \text{ W m}^{-2}$ às 07:00h. Em ambos os cenários (com e sem aquecimento) as taxas de transferência de calor no período quente foram mais elevadas em aproximadamente 14% em comparação com o período frio, de modo que se pode afirmar que o grau de saturação do solo não apresenta uma influência expressiva nas trocas de calor com a biomassa.

As trocas de calor entre a biomassa e o solo por radiação térmica apresentaram todos os valores positivos, indicando também que a biomassa perde calor para o solo, tanto no cenário com aquecimento quanto no cenário sem aquecimento, para os dois períodos estudados (período quente e período frio). O comportamento foi bem semelhante à troca por condução, uma vez que no cenário sem aquecimento, os valores apresentaram menores variações ao longo do dia, com valor máximo de $6,43 \text{ W m}^{-2}$ às 12:00h e mínimo de $6,0 \text{ W m}^{-2}$ às 01:00h no período quente; e valor máximo de $6,0 \text{ W m}^{-2}$ às 12:00h e mínimo de $5,9 \text{ W m}^{-2}$ às 00:00h no período frio. No cenário com aquecimento, os resultados variaram de acordo com os períodos em que o efluente está mais aquecido, de modo que no período quente, o fluxo de calor máximo foi de $43,9 \text{ W m}^{-2}$ às 17:00h e o fluxo mínimo foi de $24,3 \text{ W m}^{-2}$ às 07:00h, enquanto no período frio, o máximo foi de $33,7 \text{ W m}^{-2}$ às 17:00h e o mínimo foi de $13,7 \text{ W m}^{-2}$ às 07:00h. No cenário sem aquecimento a taxa de transferência de calor no período quente foi mais elevada em aproximadamente 7% em comparação com o período frio, ao passo que no cenário com aquecimento esse valor é de cerca de 23%. As trocas por condução entre a biomassa e o solo foram mais intensas do que as trocas por radiação térmica, principalmente no cenário com aquecimento.

A temperatura do solo nos dois cenários (com e sem aquecimento) para os períodos quente e frio apresentou um comportamento linear, com pequenas variações ao longo do dia.

No cenário sem aquecimento, a temperatura média obtida ficou na faixa de 24,3°C para o período quente e 21,9°C para o período frio; ao passo que no cenário com aquecimento a temperatura média ficou na faixa de 28,4°C para os períodos quente e frio, o que mostra que o solo recebe calor da biomassa aquecida. A temperatura da biomassa mostrou um comportamento linear no cenário sem aquecimento, com resultados muito próximos da temperatura do solo no cenário sem aquecimento, com média de 24,2°C no período quente e 21,9°C no período frio. No cenário com aquecimento, no entanto, as temperaturas foram maiores das 08:00 às 17:00h com valores médios de 32,5°C e nos demais horários do dia a temperatura ficou na faixa de 28,4°C nos períodos quente e frio. As temperaturas da biomassa e do solo apresentaram valores muito similares, principalmente no cenário sem aquecimento, uma vez que o solo é responsável pela manutenção da temperatura no interior dos biodigestores, devido a sua alta inércia térmica. Além disso, pode-se afirmar que a temperatura da biomassa é capaz de atingir e se estabilizar em 30°C, temperatura considerada ideal para a operação dos biodigestores, mesmo após as trocas térmicas com o biogás e com o solo.

3.4 CONCLUSÕES

O estudo de trocas térmicas em reatores anaeróbios com efluente aquecido é uma abordagem ainda incipiente, principalmente no Brasil, de modo que os resultados desse trabalho são de grande relevância para otimizar a operação de biodigestores modelo lagoa coberta, como por exemplo na escolha de materiais para sua construção e melhorias no fluxo de energia dentro e fora dos reatores.

Os resultados obtidos atestaram que a radiação solar é a fonte primária de aquecimento dos biodigestores e que a alta inércia térmica do solo contribui com a baixa variação da temperatura da biomassa ao longo do dia, mesmo no cenário com o efluente aquecido.

O biogás troca calor com o ambiente externo por meio da radiação solar, convecção e radiação térmica, de modo que apresentou um comportamento similar à temperatura ambiente, com altas amplitudes diárias. A taxa de transferência de calor por radiação no período quente foi mais elevada em aproximadamente 41% em comparação com o período frio, uma vez que há uma maior incidência de radiação solar nos meses relativos ao período quente. O biogás ainda troca calor com a biomassa por convecção e radiação térmica, porém as taxas de transferência de calor entre esses dois componentes foram muito inferiores às taxas provenientes das trocas do biogás com o ambiente externo. Desse modo, o aquecimento da biomassa se mostrou interessante, visto que apenas uma pequena parcela do calor recebido pelo

biogás, proveniente do meio externo, é cedido para a biomassa. Além disso, as trocas térmicas entre o biogás, a biomassa e o ambiente externo foram as mesmas nos cenários com e sem aquecimento.

Em contrapartida, as trocas de calor entre a biomassa e o solo foram diferentes nos cenários com e sem aquecimento. A biomassa e o solo trocam calor por meio da condução e radiação térmica, sendo as taxas de transferência de calor mais elevadas no cenário com aquecimento, uma vez que houve uma maior diferença térmica entre os dois compostos. Além disso, as trocas por condução foram mais intensas do que as trocas por radiação térmica, principalmente no cenário com aquecimento.

Por fim, no cenário com aquecimento, mesmo após as trocas térmicas com o biogás e com o solo, a temperatura da biomassa é capaz de atingir e estabilizar em 30°C, temperatura considerada ideal para a operação dos biodigestores, tanto no período quente quanto no período frio.

REFERÊNCIAS

ADROVER, M. E.; COTABARREN, I.; MADIES, E.; RAYES, M.; REARTES, S. B. R.; PEDERNERA, M. Anaerobic co-digestion of rabbit manure and sorghum crops in a bench-scale biodigester. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 42, n. 7, p. 1-12, 2020.

ASTM. **ASTM D792-13**. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. 2013. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/D792>. Acesso em: 15 maio 2020.

COELHO, M. F. L.; LAVOIE, F. L. Comportamento da geomembrana de PEAD exposta ao envelhecimento acelerado. *In*: Congresso Brasileiro de Polímeros, 14, 2017, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia, 2017.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; FERRAZ JUNIOR, A. D. N.; DOS SANTOS, M. M.; JOPERT, C. L. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo: IEE-USP, 2018, 218 p.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

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

DIN. **DIN 52612-2**. Tesing of thermal insulating materials; determination of thermal conductivity by means of the guarded hot plate apparatus; conversion of the measured values for building applications. 1984. Disponível em: <https://standards.globalspec.com/std/171082/DIN%2052612-2>. Acesso em: 15 maio 2020.

DOS SANTOS, L. D.; MAYERLE, S. F.; TAVARES, J. M. R.; SCHLINDWEIN, S. L. Otimização de um sistema de coleta, transporte e transformação de dejetos suínícolas em biofertilizante e biogás. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 883-910, 2020.

EMBRAPA. **Os solos do Brasil**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 01 out. 2019.

ENERGY PLUS. **PDF Documentation**. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 15 maio 2020.

ENERGY PLUS. **Input Output Reference**. U.S. Department of Energy, p. 1–2805, 2021.

FEAM. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2019. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mapadosolo/mapa_solos_4.jpg. Acesso em: 01 out. 2019.

FERNANDES, G.; MARIANI, L. **O alto potencial de produção e uso fará do biogás a próxima fronteira de energia renovável no Brasil?** Boletim energético: FGV Energia. 2019.

FOWLER, R. H. The analysis of photoelectric sensitivity curves for clean metals at various temperatures. **Physical Review**, v. 38, p. 45-56, 1931.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LOPES, J. O. **Modelagem da produção de metano e do balanço energético em biodigestores modelo lagoa coberta**. 2020, 77f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambientais) – Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

MEEGODA, J. N.; LI, B.; PATEL, K.; WANG, L. B. A review of the process, parameters, and optimization of anaerobic digestion. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 10, 2224, p. 1-16, 2018.

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

RESENDE, B. C. **Influência do solo no desempenho térmico de habitações com cômodos subterrâneos**. 2017, 244f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SCHNURER, A; BOHN, I; MOESTEDT, J. Protocol for start-up and operation of CSTR biogas processes. *In*: MCGENITY, T. J.; TIMMIS, K. N.; FERNANDEZ, B. N. **Hydrocarbon and**

Lipid Microbiology Protocol. Springer Protocols Handbooks: Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2016.

SILVA, J. E. P. **Avaliação técnica e econômica de um biodigestor de fluxo tubular:** estudo de caso do modelo implantado na ETEC “Orlando Quagliato” em Santa Cruz do Rio Pardo, SP. 2016, 69f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2016.

VAZ, P. N. **Simulação de biodigestor de fluxo tubular com e sem sistemas de agitação e aquecimento.** 2019, 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions.** 1. ed. London: IWA, 2005.

VÖGELI, Y., LOHRI, C. R., GALLARDO, A., DIENER, S., ZURBRÜGG, C. **Anaerobic digestion of biowaste in developing countries:** Practical Information and Case Studies. Dübendorf: Eawag – Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2014.

XING, L. U. **Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling.** 2014, 406f. Thesis (Doctorate in Philosophy), Oklahoma State University, Stillwater, 2014.

CAPÍTULO 4: CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 CONCLUSÃO GERAL

Os biodigestores modelo lagoa coberta na granja em estudo não possuem um sistema de aquecimento, portanto operam em função das condições climáticas a que estão susceptíveis, o que pode comprometer a eficiência do tratamento dos efluentes nos reatores, bem como a produção de biogás.

A proposta de um sistema de aquecimento por meio da implantação de painéis solares térmicos se mostrou vantajosa do ponto de vista energético, uma vez que, além de se tratar de uma fonte de energia renovável, o estudo teórico da geração de metano e de energia elétrica proveniente do beneficiamento do biogás indicou que 68,9% e 78,6% da demanda energética da granja poderia ser suprida quando o sistema atingisse a temperatura de 30°C, nos respectivos períodos quente e frio. Além disso, para a instalação em estudo, a temperatura de 30°C foi alcançada com o cálculo de três (período quente) e treze (período frio) painéis. Esse valor de temperatura representa o melhor custo-benefício para o aumento da sustentabilidade energética da suinocultura.

O estudo realizado para comparar a variação das temperaturas inicial (sem aquecimento), 30°C e 35°C revelou que, no período frio, a curva que representa o sistema sem aquecimento apresentou uma menor variação ao longo do dia em relação ao período quente, porém nos períodos quente e frio, as curvas das temperaturas de 30°C e 35°C apresentaram variações muito similares, com valores de temperatura mais elevados (33° e 38°C, respectivamente) durante o dia e valores inferiores a noite (28°C e 33°C, respectivamente). Esse resultado é coerente, uma vez que o sistema de aquecimento foi programado para funcionar das 7:00 às 17:00 h, de modo que a biomassa dentro do tanque de equalização vai recebendo e perdendo calor gradualmente. Entretanto, mesmo com as variações ao longo do dia, o sistema atinge as temperaturas desejadas para o aquecimento da biomassa e posterior disposição nos biodigestores.

As trocas térmicas que ocorrem entre o ambiente externo e o biogás e entre o biogás e a biomassa apresentaram as mesmas relações e valores para os cenários sem e com aquecimento, com diferenças apenas entre os períodos quente e frio, principalmente devido a maior incidência de radiação solar no período quente, com uma taxa de transferência de calor por radiação solar direta de 41% maior no período quente em relação ao período frio. Os resultados obtidos

atestaram que a radiação solar é a fonte primária de aquecimento dos biodigestores modelo lagoa coberta.

O biogás ganha mais calor do ambiente por convecção ($-41,6 \text{ W m}^{-2}$ no período quente e $-31,4 \text{ W m}^{-2}$ no período frio) e radiação térmica ($-942,0 \text{ W m}^{-2}$ no período quente e $-648,8 \text{ W m}^{-2}$ no período frio) do que perde para o ambiente. Além disso, a taxa de transferência de calor do biogás para a biomassa por convecção ($3,4 \text{ W m}^{-2}$ no período quente e $2,4 \text{ W m}^{-2}$ no período frio) e da biomassa para o biogás ($-2,2 \text{ W m}^{-2}$ no período quente e $-2,1 \text{ W m}^{-2}$ no período frio) foram próximas, principalmente no período frio. No caso das trocas entre o biogás e a biomassa por radiação térmica, o calor transferido da biomassa para o biogás foi aproximadamente 39% e 52% do calor transferido do biogás para a biomassa nos períodos quente e frio, respectivamente. Desse modo, o aquecimento da biomassa se torna interessante, visto que apenas uma pequena parcela do calor recebido pelo biogás, proveniente do meio externo, é cedido para a biomassa.

As trocas de calor entre o solo e a biomassa aquecida no interior dos biodigestores, por sua vez, foram mais elevadas em comparação ao cenário sem o aquecimento da biomassa, devido a maior amplitude térmica entre os compostos. A biomassa perde calor para o solo em ambos os cenários. No cenário sem aquecimento, os valores foram mais lineares ao longo do dia e não variaram muito em relação ao período quente ($-7,9 \text{ W m}^{-2}$ por condução e $6,43 \text{ W m}^{-2}$ por radiação térmica) e período frio ($-6,8 \text{ W m}^{-2}$ por condução e $6,0 \text{ W m}^{-2}$ por radiação térmica). Entretanto, no cenário com aquecimento, os resultados variaram de acordo com os períodos em que o efluente está mais aquecido, com taxa de transferência de calor de $-104,6 \text{ W m}^{-2}$ no período quente e $-89,7 \text{ W m}^{-2}$ no período frio (troca por condução) e $43,9 \text{ W m}^{-2}$ no período quente e $33,7 \text{ W m}^{-2}$ no período frio (troca por radiação térmica).

A temperatura da biomassa apresentou um comportamento linear no cenário sem aquecimento, com resultados muito próximos da temperatura do solo no cenário sem aquecimento, com média de $24,2^\circ\text{C}$ no período quente e $21,9^\circ\text{C}$ no período frio. No cenário com aquecimento, no entanto, houve maiores variações diárias, com médias máximas de $32,5^\circ\text{C}$ e mínimas de $28,4^\circ\text{C}$ nos períodos quente e frio. Entretanto, no cenário com aquecimento, a biomassa consegue manter a temperatura considerada ideal para a operação dos biodigestores (30°C), mesmo após as trocas térmicas com o biogás e com o solo, tanto no período quente quanto no período frio.

Os resultados desse trabalho são de grande relevância para otimizar a operação de biodigestores modelo lagoa coberta, como por exemplo na escolha de materiais para sua

construção e melhorias no fluxo de energia dentro e fora dos reatores e, assim, contribuir para uma maior sustentabilidade energética dos sistemas agroindustriais de tratamento de efluentes.

4.2 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Diante dos resultados obtidos neste estudo e das conclusões supracitadas, recomenda-se para pesquisas futuras:

- Realizar uma análise de custo do sistema de aquecimento proposto, considerando o tempo de retorno proveniente do uso do biogás na produção de energia elétrica e/ou térmica;
- Retomar o funcionamento dos sensores para monitoramento das temperaturas, a fim de criar um banco de dados maior e mais compatível com o arquivo climático para calibração dos modelos;
- Ajustar os modelos do tanque de equalização e do biodigestor, a fim de apresentarem indicadores mais similares;
- Implementar em escala laboratorial o modelo de sistema de aquecimento proposto e analisar a produção de biogás e geração de energia, além de avaliar as trocas térmicas do reator com o meio circunvizinho;