

PATRÍCIA NOGUEIRA VAZ

**SIMULAÇÃO DE BIODIGESTOR DE FLUXO TUBULAR COM E SEM
SISTEMAS DE RECIRCULAÇÃO E AQUECIMENTO**

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*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

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

T

V393s
2019 Vaz, Patrícia Nogueira, 1992-
Simulação de biodigestor de fluxo tubular com e sem
sistemas de recirculação e aquecimento / Patrícia Nogueira Vaz.
– Viçosa, MG, 2019.
xvi, 98 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Delly Oliveira Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Biodigestores. 2. Biodigestores - Simulação por
computador. 3. Bioenergia. 4. Resíduos de animais - Tratamento
térmico. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

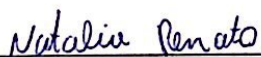
CDD 22. ed. 665.776

PATRÍCIA NOGUEIRA VAZ

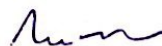
**SIMULAÇÃO DE BIODIGESTOR DE FLUXO TUBULAR COM E SEM
SISTEMAS DE RECIRCULAÇÃO E AQUECIMENTO**

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: 15 de fevereiro de 2019.



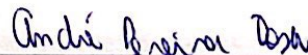
Natalia dos Santos Renato



Paulo Marcos de Barros Monteiro



Joyce Correna Carlo



André Pereira Rosa
(Coorientador)



Delly Oliveira Filho
(Orientador)

Assim, permanecem agora estes três: a fé, a esperança e o amor. O maior deles, porém, é o amor. (1 Coríntios 13:13)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por cada dia de trabalho.

À minha família pelo apoio e suporte.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pelo incentivo à pesquisa e pelo confortável ambiente de estudo e companheirismo.

À CAPES, CNPq e FAPEMIG, pelo financiamento da pesquisa.

Ao orientador Professor Delly Oliveira Filho e aos co-orientadores Professor Márcio Arêdes Martins e Professor André Pereira Rosa, pela oportunidade de pesquisa, orientações e debates valiosos para acréscimo de experiências. A todos os Professores e servidores, em especial a Professora Joyce Correna Carlo, pelas contribuições, conselhos e atenção durante a pesquisa.

A todos os amigos pelo incentivo, carinho e orações.

BIOGRAFIA

Patrícia Nogueira Vaz nasceu na cidade de Carmo do Cajuru - MG, filha de Marta Helena Nogueira Vaz e Nilton Nogueira Vaz.

Realizou o ensino fundamental na Escola Estadual Padre João Parreira Vilaça, em sua cidade natal. cursou ensino médio integrado com o curso técnico em Eletromecânica no Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET de Minas Gerais no campus de Divinópolis. No ano de 2010 ingressou no curso de graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

No intervalo de março de 2014 a fevereiro de 2015 fez intercâmbio na Alemanha, durante 6 meses na *Hochschule* Schmalkalden onde estudou o idioma alemão e depois durante outros 6 meses na *Fachhochschule* Bielefeld onde cursou disciplinas do curso de Engenharia Elétrica, pelo Programa Federal Ciência sem Fronteiras/CNPq, retornando posteriormente para a UFV.

Colou grau em janeiro de 2017 e em março de 2017 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de mestrado, pelo Departamento de Engenharia Agrícola, no setor de Energia, submetendo-se à defesa da dissertação em 15 de fevereiro de 2019.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
 Capítulo 1: Considerações iniciais	1
1.1 Introdução Geral	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo geral.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Estrutura da dissertação	5
1.4 Limitações da pesquisa	5
1.5 Contribuições da pesquisa.....	6
1.6 Referências bibliográficas	7
 Capítulo 2: Estado da arte da biodigestão anaeróbia em reatores e técnicas de modelagem e simulação	8
2.1 Introdução	8
2.2 Objetivos	10
2.3 Material e Métodos	11
2.4 Princípio de funcionamento de biodigestores	11
2.5 Parâmetros da biodigestão anaeróbia	13
2.6 Tipos de Biodigestores.....	16
2.7 Tecnologias para simulação de biodigestores	24
2.8 Tecnologias para monitoramento e controle de biodigestores...	28
2.9 Conclusão	30
2.10 Referências bibliográficas.....	32

Capítulo 3: Trocas térmicas de biodigestor de fluxo tubular utilizando o software Energy Plus		36
3.1	Introdução	36
3.2	Objetivos	41
3.2.1	Objetivo geral.....	41
3.2.2	Objetivos específicos.....	41
3.3	Material e Métodos	42
3.3.1	Modelagem do biodigestor e das condições de contorno.....	42
3.3.2	Balanço de energia e mapeamento de temperaturas	45
3.3.3	Validação da simulação.....	49
3.4	Resultados e Discussão.....	50
3.4.1	Balanço de energia e mapeamento de temperaturas	50
3.4.2	Validação da simulação.....	66
3.5	Discussão Final.....	67
3.6	Conclusão	67
3.7	Referências bibliográficas	68
Capítulo 4: Simulação com dinâmica dos fluidos computacional do comportamento termodinâmico de biodigestor tubular.....		72
4.1	Introdução	72
4.2	Objetivos	74
4.2.1	Objetivo geral.....	74
4.2.2	Objetivos específicos.....	74
4.3	Material e Métodos	74
4.3.1	Modelagem de biodigestor e das condições de contorno.....	74
4.3.2	Simulação de sistemas de aquecimento e recirculação	79
4.4	Resultados e Discussão.....	82
4.4.1	Modelagem do biodigestor e das condições de contorno.....	82
4.4.2	Implementação de sistemas de aquecimento e recirculação	85

4.5	Conclusão	94
4.6	Referências Bibliográficas.....	94
	Capítulo 5: Conclusão Geral	97
	Sugestão de Trabalhos Futuros	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades térmicas do polietileno de alta densidade (PEAD). (Adaptado de Souza, Rossini e Schaeffer, 2013).	44
Tabela 3.2 - Propriedades da lã de vidro.	49
Tabela 3.3 - Variância da temperatura média diária do ar ambiente, do solo de dados da estação meteorológica e do biodigestor e de suas partes simulado no <i>software Energy Plus</i> para o período de inverno e de verão.	54
Tabela 3.4 – Comparação de temperaturas dos dados simulados e observados.	66
Tabela 4.1 - Propriedades termofísicas do substrato.....	77
Tabela 4.2 – Especificações da malha e tempo de simulação.	84
Tabela 4.3 - Distribuição da temperatura, gradiente de velocidade e desvio padrão da temperatura.	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - A matriz energética associada à geração de eletricidade no Brasil - ano base 2017 (EPE, 2018).....	3
Figura 2.1 - Rotas metabólicas e grupos de microrganismos envolvidos na biodigestão anaeróbia (adaptado Chernicharo, 1997).....	12
Figura 2.2 - Biodigestores de baixa modelos (a) indiano; (b) chinês; (c) fossa séptica; e (d) tubular com manta plástica taxa (adaptado Chernicharo, 1997).....	17
Figura 2.3 - Representação esquemática de um biodigestor de alta taxa de primeira geração (adaptado Chernicharo, 1997).....	19
Figura 2.4 - Representação esquemática de filtro anaeróbio leito fixo com (a) fluxo ascendente e (b) fluxo descendente, (adaptado Chernicharo, 1997).....	20
Figura 2.5 - Representação esquemática do reator anaeróbio de leito expandido/fluidificado (adaptado Chernicharo, 1997).....	21
Figura 2.6 - Representação esquemática de biodigestor anaeróbio compartimentado (adaptado Chernicharo, 1997).....	21
Figura 2.7 - Representação esquemática de biodigestores anaeróbios (a) de fluxo ascendente e manda de lodo (U_{ASB}) e (b) de leito granular expandido (E_{GSB}) (adaptado Chernicharo, 1997).....	23
Figura 3.1 – Vista de um biodigestor real de fluxo tubular com manta plástica (Sinuelo, 2016).....	38
Figura 3.2 - Maquete do biodigestor elaborado no <i>software Google SketchUp</i>	43
Figura 3.3 - Representação das trocas térmicas das mantas do biodigestor. ...	46
Figura 3.4 – Temperatura horária de bulbo seco no meio externo e comportamento simulado no <i>software Energy Plus</i> da temperatura média horária da interface da manta plástica inferior horizontal com o solo e da temperatura média horária no interior do biodigestor, no período de inverno.	50
Figura 3.5 – Temperatura média diária do ar ambiente, do solo e comportamento simulado no <i>software Energy Plus</i> da temperatura média diária da interface da manta plástica inferior horizontal com o solo e da	

temperatura média horária no interior do biodigestor nos períodos de: (a) Inverno e (b) Verão.....	52
Figura 3.6 - Diferença da temperatura do substrato com e sem a camada do material isolante para os períodos de: (a) Inverno e (b) Verão.....	56
Figura 3.7 – Taxa de transferência de calor da manta inferior do biodigestor para o solo, no sentido positivo (biodigestor para o solo) e negativo (solo para o biodigestor) nos períodos de: (a) Inverno e (b) Verão.	57
Figura 3.8 – Taxas de transferência de calor entre a manta plástica superior do biodigestor e o meio externo e interno, nos períodos: (a) Inverno, (b) Horária no dia do solstício de inverno, (c) Verão e (d) Horária no dia do solstício de verão.....	62
Figura 3.9 – Balanço da taxa de transferência de calor por radiação, condução e convecção, na manta superior do biodigestor, para o período: (a) Inverno e (b) Verão.....	65
Figura 4.1 - Vista em corte longitudinal do biodigestor da suinocultura da UFV.	75
Figura 4.2 – Planta baixa do biodigestor da granja de suínos da Universidade Federal de Viçosa (Leandro e Maradini, 2018).....	76
Figura 4.3 - Vista inferior da planta baixa do biodigestor modelado.	80
Figura 4.4 - Representação esquemática do sistema de recirculação e aquecimento do biodigestor para o Caso (i).	81
Figura 4.5 – Malha final da modelagem do biodigestor.	83
Figura 4.6 – Comportamento da velocidade no interior do biodigestor, desde o tubo de entrada (esquerda) até o tubo de saída (direita) para o Caso (0).	85
Figura 4.7 – Vista em planta baixa e em corte longitudinal das linhas de corrente do escoamento do substrato para o Caso (0).....	86
Figura 4.8 – Vista em planta baixa do comportamento das linhas de corrente do escoamento para o Caso (i).....	88
Figura 4.9 – Distribuição da temperatura do substrato em diferentes profundidades do biodigestor para o Caso (i) (a) no topo do biodigestor, (b) a 1,66 m profundidade, (c) a 2,00 m profundidade e (d) na base do biodigestor.	89
Figura 4.10 – Comportamento da temperatura no interior do biodigestor, de vistas em corte transversal e corte longitudinal, para o Caso (i).....	90

Figura 4.11 - Distribuição da temperatura ao longo do eixo x do biodigestor: (a) a 2,0 m; (b) a 8,0 m e (c) a 10,0 m, para o Caso (ii).	91
Figura 4.12 - Vista em planta baixa do comportamento das linhas de corrente do escoamento para o Caso (ii).	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A - Área da superfície (m^2);
- A_{BR} - Reator anaeróbio compartimentado (do inglês *Anaerobic baffled reactor*);
- A_{EBR} - Reator anaeróbio de leito expandido (do inglês *Anaerobic Expanded-Bed Reactor*);
- A_{FBR} - Reator anaeróbio de leito fluidificado (do inglês *Anaerobic Fluidized-Bed Reactor*);
- A_{MBR} - Reator de Manta Migratória Anaeróbica (do inglês *Anaerobic Migrating Blanket Reactor*);
- CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior;
- CEFET - Centro Federal de Educação Tecnológica;
- CFD - Dinâmica dos Fluidos Computacional (do inglês *Computational Fluid Dynamics*);
- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;
- c_p - calor específico ($J/K\ kg$);
- CSTR's - Reatores de Tanque Continuamente Agitados;
- DA - Digestão anaeróbia;
- D_{BO} - Demanda Bioquímica de Oxigênio;
- DEA - Departamento de Engenharia Agrícola;
- D_h - Diâmetro hidráulico (m);
- D_{QO} - Demanda Química de Oxigênio;
- D_{SFF} - Reator de leito fixo com fluxo descendente (do inglês *Downflow Stationary Fixed Film*);
- E_{EAD} - Digestor Anaeróbico de Eletrólise Melhorada (do inglês *Electrolysis Enhanced Anaerobic Digestion*);
- E_{GSB} - Reatores de Manta de Lodo Granular Expandido (do inglês *Expanded Granular Sludge Blanket reactor*);
- EPlus - *Energy Plus*;
- EUA - Estados Unidos da América;
- F - Forças atuantes no corpo;
- FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais;
- \bar{G} - Gradientes de velocidade absoluta (s^{-1});
- h_c - Coeficiente de convecção da superfície ($W/m^2\ K$);
- HS - Hemisfério Sul;

Ic – Reator de Circulação Interna (do inglês *Internal Circulation reactor*);
IEA – Agência Internacional de Energia (do inglês *International Energy Agency*);
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia;
k - Condutividade térmica do solo (W/m K);
L – Comprimento (m);
MG - Minas Gerais;
MMA - Ministério do Meio Ambiente;
MVF - Método de volumes finitos;
OECD - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico;
p - pressão de entrada do fluido (Pa), obs.: 1 Pa = 9,869 x 10⁻⁶ atm;
PEAD - Polietileno de alta densidade;
pH – Potencial hidrogeniônico;
PID - Proporcional Integral e Derivativo;
PNB - Plano Nacional do Biodiesel;
PROALCOOL - Plano Nacional do Álcool;
PVC - Policloreto de vinila (do inglês *Polyvinyl chloride*)
Q_{at} - Taxa de transferência de radiação solar (kW);
Q_{atmédio} - Taxa de transferência de radiação solar média (kW);
Re - Número de Reynolds, (adimensional);
T - Temperatura do fluido (K);
T_{ar} - Temperatura do ar ambiente (K);
TARP - Programa de Pesquisa em Análise Térmica;
T_{imh} - Temperatura média horária na interface da manta plástica inferior horizontal com o solo (K);
T_{RH} - Tempo de Retenção Hidráulica;
T_{RS} - Tempo de Retenção de Sólidos;
U_{ASB} - Digestor anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*);
UFV - Universidade Federal de Viçosa;
v - Vetor velocidade absoluta do fluido (m/s);
μ - Viscosidade dinâmica (Pa s);
ρ - Massa específica (kg/m³);
σ – Desvio padrão (adimensional);

ϕ – vazão (L/s); e

τ - Tensor de tensão viscosa (N/m²).

RESUMO

VAZ, Patrícia Nogueira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Simulação de biodigestor de fluxo tubular com e sem sistemas de recirculação e aquecimento.** Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: Marcio Arêdes Martins e André Pereira Rosa.

Os biodigestores têm sido muito utilizados mundialmente, devido ao fato que, associado ao tratamento ambiental pode-se produzir o biogás (fonte de energia) e o biofertilizante, em um mesmo processo. O biodigestor de fluxo tubular é o mais utilizado no Brasil, porém ainda enfrenta grandes dificuldades de implementação por possuir baixa eficiência. Desta forma esta pesquisa buscou propor formas de melhorias para eficiência energética deste biodigestor. Sendo assim apresenta (i) uma revisão sobre o princípio de funcionamento dos reatores anaeróbios, os principais parâmetros e tipos de biodigestores empregados neste processo, bem como as tecnologias desenvolvidas para otimização da biodigestão anaeróbia, como modelagem para simulação e implementação formas de controle e automação, (ii) análise das trocas térmicas do modelo tubular por meio de simulações no *software Energy Plus*, (iii) estudo do comportamento termodinâmico do biodigestor tubular com e sem a implementação de sistemas de recirculação e aquecimento, através de simulações em CFD. A modelagem realizada no *EPlus* teve seus dados validados, apresentando erros percentuais médios abaixo de 3 %. E constatou que na ausência de um sistema de aquecimento, este modelo de reator é dependente das variações climáticas locais. Observou-se também que a temperatura média alcançada com o sistema de aquecimento, 33 °C, é uma temperatura considerada ótima para a produção de biogás. Portanto, a simulação mostrou ser uma ferramenta importante para estudos com esse modelo de biodigestor e pode auxiliar tanto no dimensionamento de novas unidades quanto na avaliação de modelos existentes.

ABSTRACT

VAZ, Patrícia Nogueira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Simulation of plug flow digester with and without agitation and heating systems**. Advisor: Delly Oliveira Filho. Co-advisors: Marcio Arêdes Martins and André Pereira Rosa.

The digesters have been widely used worldwide, because, together with the environmental treatment, biogas (energy source) and fertilizer can be produced in the same process. The plug flow digester is the most used in Brazil, but still faces great difficulties of implementation because it has low efficiency. In this way, this research sought to propose ways of improving the energy efficiency of this digester. Thus, it presents (i) a review on the operating principle of anaerobic reactors, the main parameters and types of digesters used in this process, as well as the technologies developed to optimize anaerobic digestion, such as modeling for simulation and implementation of control and automation forms; (ii) analysis of the thermal changes of the plug flow model through simulations in the Energy Plus software; e (iii) study of the thermodynamic behavior of the plug flow digester with and without the implementation of agitation and heating systems, through simulations in CFD. The modeling performed in EPlus had its data validated, presenting average percentage errors below 3%. In addition, he found that in the absence of a heating system, this model of the reactor is dependent on local climatic variations. It was also observed that the mean temperature reached with the heating system, 33 °C, is a temperature considered optimal for the production of biogas. Therefore, the simulation showed to be an important tool for studies with this model of the digester and can help both in the design of new units and in the evaluation of existing models.

Capítulo 1: Considerações iniciais

1.1 Introdução Geral

Investimentos no desenvolvimento de tecnologias e na implementação da geração de fontes de energia renovável têm sido alvo recorrente de discussão pública, política e científica. Dentre as razões para tal discussão, destaca-se a possível relação entre a adoção de fontes renováveis de energia na matriz energética dos países, a mitigação de gases de efeito estufa e a relação com as mudanças climáticas em curso. É notável o crescimento nas matrizes energéticas de países desenvolvidos e em desenvolvimento da participação das fontes renováveis de energia, destacando-se: a energia solar fotovoltaica, a energia eólica e a energia de biomassa, como por exemplo o biogás (Holma *et al.*, 2018).

No ano de 2016, 59% do aumento da capacidade de geração de energia elétrica mundial foi de fontes renováveis de energia. Nos últimos 10 anos estas fontes alternativas de energia elétrica, exceto as hidrelétricas, cresceram 16,2% ao ano (Hache, 2018; York e Bell, 2019).

Dentre as fontes renováveis de energia, a energia de biomassa, especialmente o biogás vem ganhando cada vez mais espaço e uma das possíveis razões estão associadas ao fato que o biogás é um subproduto da biodigestão anaeróbia de resíduos e seu aproveitamento pode ser fonte de energia térmica e elétrica a empreendimento. Pelo processo de digestão anaeróbia (DA) da biomassa, o biogás ao ser produzido, torna-se uma fonte sustentável de energia. O biogás pode ser produzido por diversos tipos de biomassa, a saber: esgoto urbano, resíduos sólidos urbano, resíduos orgânicos da agroindústria e cultivos energéticos (Budzianowski, 2012).

Na Europa, o biogás teve um acréscimo como fonte de energia primária de 104% entre os anos de 2006 e 2011. Neste mesmo período houve um aumento de produção do subproduto no continente a partir de aterros sanitários e lodo de esgoto de 3,2% e 36,6%, respectivamente. Já as demais fontes para a produção de biogás somadas acarretaram um crescimento de 351% para o período (Grima-Olmedo, Ramírez-Gómez E Alcalde-Cartagena, 2014).

Ressalta-se também, que a energia do biogás possui grande potencial tanto para sistemas de energia distribuída quanto centralizada. Este fato possui implicações positivas quanto a flexibilidade de escala ou modularidade e geração de emprego e renda, além de promover a mudança no paradigma no gerenciamento de resíduos nas esferas local e regional.

Até mesmo a atratividade econômica de usinas a biogás pode ser maior do que outras fontes renováveis de energia em muitos países. Porém, devido à falta de incentivos políticos e de pesquisa, aliadas a ineficiência atual no modo de produção e utilização não se observa uma expansão significativa do biogás na matriz energética de uma série de países, como o Brasil (Budzianowski, 2012). Mas ainda assim a implementação de fontes renováveis de energia obteve um aumento significativo nos últimos anos em países desenvolvidos e emergentes, como o Brasil.

O sistema elétrico de potência do Brasil é primordialmente centralizado com grandes usinas geradoras, localizadas na sua grande maioria distantes dos grandes centros de consumo. Segundo Almeida *et al.* (2017) o sistema elétrico brasileiro vem sendo melhorado continuamente com a implementação de equipamentos para mitigar problemas na rede elétrica. Porém, ainda assim ocorrem distúrbios constantes, como interrupções, afundamentos e elevações da tensão, harmônicos, afetando a confiabilidade e a qualidade do fornecimento aos consumidores.

A geração distribuída apresenta com vantagens a melhoria da qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, dentre eles o perfil de tensão e diminuição de perdas na linha. Este tipo de geração pode ser realizado com usinas que operam a biogás.

O Brasil possui além do expressivo potencial da geração de energia a partir de hidrelétricas, a geração de outras fontes de energia renovável como a energia solar, eólica e de biomassa. A matriz energética associada à geração de eletricidade no Brasil (Figura 1.1) é altamente renovável em sua grande parte devido as hidrelétricas responsáveis por 65,2 % do total (EPE, 2018).

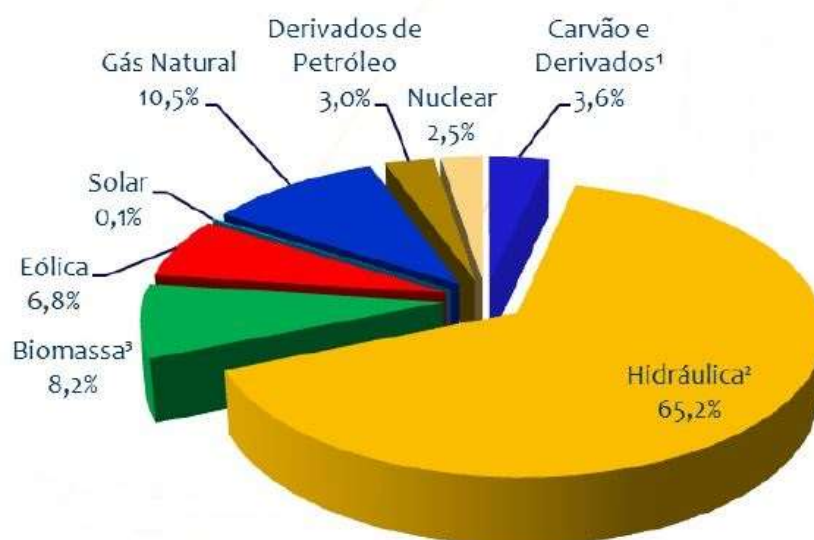


Figura 1.1 - A matriz energética associada à geração de eletricidade no Brasil - ano base 2017 (EPE, 2018).

Em segundo lugar na categoria de fontes renováveis está a biomassa responsável por 8,2 % da matriz energética associada à geração de eletricidade brasileira. Ao se comparar a porcentagem da matriz energética que a biomassa representava em 2012 com o ano de 2016, pode se observar um aumento de 15,3 % (Almeida *et al.*, 2017).

Porém, devido ao grande aumento da demanda e também as grandes crises hídricas, o Brasil reduziu em 1,3 % a participação de fontes renováveis de energia para as não renováveis do ano de 2016 para 2017. Neste mesmo período o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira aumentou em 1,6 %. O que torna a investigação por fontes renováveis de energia mais viáveis economicamente, confiáveis e eficientes um alvo de discussões políticas, científicas e econômicas (Dranka e Ferreira, 2018; EPE, 2018).

Alguns benefícios do uso de biogás são vistos a partir da redução das emissões de gases de efeito estufa (Ding *et al.*, 2012), como o CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), compostos orgânicos voláteis e também a redução da precipitação de chuva ácida, que são causadas pela emissão de gases como os óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x), além de minimizar a poluição do ar e do solo. O efluente da DA pode ser utilizado como biofertilizantes, o que

contribui diretamente para o desenvolvimento sustentável, e a diminuição da demanda de fertilizantes químicos (Budzianowski, 2012).

O biogás é classificado como um biocombustível e de acordo com a biomassa pode compreender em 40-75% de metano, 20-45% de dióxido de carbono e alguns outros compostos como hidrogênio sulfuroso, amoníaco, vapor de água e compostos orgânicos voláteis (Budzianowski, 2012; Rajendran *et al.*, 2014). Uma maior porcentagem de metano do biogás é o que o torna mais eficiente para a geração de energia térmica e/ou elétrica (Seman *et al.*, 2019).

Desta forma a otimização da produção do biogás e da concentração de metano na digestão anaeróbia, favorece o seu potencial como combustível. O controle das variáveis da biodigestão anaeróbia deve permitir a degradação da matéria orgânica de forma mais eficiente, deve favorecer a geração do biogás em maior quantidade e um maior enriquecimento de metano. Igualmente deve valorizar o efluente tratado (biofertilizante) como fonte de nutrientes na atividade agrícola e diminuir a carga orgânica do efluente. Ressalta-se que segundo Silva (2017), a produção de biogás em biodigestores controlados em relação ao não automatizados obteve um acréscimo da ordem de 102%. Dentro deste contexto, conhecer a biodigestão, bem como os processos de transferência térmica envolvidas no processo para um projeto de automação de biodigestores é de grande importância (Balmant, 2009).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudar as trocas térmicas do biodigestor tubular de manta plástica para passível implementação de um sistema controlado de recirculação e aquecimento.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Analisar as trocas térmicas de um biodigestor de fluxo tubular, quantificando a transferência de calor para o solo e para o ar ambiente;

- ii. Implementar e avaliar diferentes sistemas de aquecimento e recirculação no biodigestor de fluxo tubular; e
- iii. Realizar balanço de energia para a implementação do sistema de aquecimento e de recirculação.

1.3 Estrutura da dissertação

Essa dissertação de mestrado é composta por 5 capítulos.

O Capítulo 1 é uma breve introdução do tema geral estudado e também apresenta as limitações e contribuições do estudo.

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte das simulações e experimentos com biodigestores com e sem sistemas de automação, analisando os principais parâmetros de controle para diversos modelos estudados.

O Capítulo 3 analisa as trocas térmicas do biodigestor modelo tubular da suinocultura por meio de simulação no *software Energy Plus*.

O Capítulo 4 analisa a simulação de um sistema de aquecimento e recirculação acoplados utilizando a técnica de dinâmica dos fluidos computacional e apresenta o balanço de energia do sistema. Foram estudadas duas formas de operação de recirculação que alteram o escoamento do substrato do biodigestor.

O Capítulo 5 aborda a conclusão geral do estudo e sugere alguns tópicos de trabalhos para dar continuidade a essa pesquisa.

1.4 Limitações da pesquisa

Os dados meteorológicos utilizados no experimento do Capítulo 3, foram da estação meteorológica mais próxima do local, ou seja, de Viçosa-MG situada cerca de 13 km da suinocultura modelada na simulação, ou seja, não foram do local avaliado.

Durante a degradação da matéria orgânica os microrganismos presentes no resíduo liberam uma certa quantidade de energia que foi negligenciada nesse trabalho. Durante as simulações realizadas no *software Energy Plus*, o substrato foi aproximado à uma massa interna uniforme com características do substrato. Assim não foi considerado que dentro do biodigestor ocorrem trocas térmicas e, portanto,

não existe parte da massa em estado líquido e parte no estado gasoso. Foi considerado que dentro do biodigestor tem uma massa “*sólida*”. Isto se deveu a limitações do *software*.

Já nas simulações com o *software* CFD o fluido dos biodigestores foi considerado como água, mantendo suas características constantes, como a de um fluido newtoniano, e com ausência de sólidos.

Em ambas os estudos de caso as trocas entre o biogás e o substrato não foram inseridas nas análises, como foi feito em outros trabalhos da literatura.

1.5 Contribuições da pesquisa

Este estudo se propôs contribuir e impulsionar novas tecnologias para otimizar a produção de biogás nos biodigestores em escala plena de suinoculturas do Brasil, pois os estudos para esse modelo são ainda escassos. Assim com a maior eficiência os biodigestores poderiam gerar mais biogás e mais energia elétrica, aumentando a independência energética local e regional. Além do mais outros modelos podem se basear nesse estudo e otimizar a produção de biogás. A principal motivação para este estudo foi de estudar a importância do controle de temperatura e de recirculação de biodigestores brasileiros. Dados da literatura informam que reatores controlados podem gerar de 102 a 130% mais biogás que os não controlados, que são os existentes no país (Silva, 2017). Uma vez que não se sabe da existência de biodigestores controlados no Brasil.

Outra contribuição desta pesquisa foi analisar e propor melhorias nos projetos de biodigestores, incluindo a inserção de camadas de material isolantes afim de melhorar o desempenho térmico do modelo, por meio do uso de *software* gratuito. As simulações foram validadas com dados de um biodigestor real de uma suinocultura da região de Viçosa-MG.

Sendo assim esta pesquisa objetivou aumentar o rendimento dos biodigestores comumente encontrados nas suinoculturas do Brasil, por meio da automação do sistema, a fim de aumentar a produção de biogás e avaliar a forma de construção dos modelos existentes.

1.6 Referências bibliográficas

ALMEIDA, C. BARICCATTI, R. A.; FRARE, L. M.; NOGUEIRA C. E. C.; MONDARDO A. A.; CONTINI L.; GOMES G. J.; *et al.* 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, n. December 2015, p. 601–608, 2017.

BUDZIANOWSKI, W. M. Sustainable biogas energy in Poland: Prospects and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 342–349, 2012.

DING, W. NIU H.; CHEN, J.; DU, J.; WU, Y. Influence of household biogas digester use on household energy consumption in a semi-arid rural region of northwest China. **Applied Energy**, v. 97, p. 16–23, 2012.

DRANKA, G. G.; FERREIRA, P. Planning for a renewable future in the Brazilian power system. **Energy**, v. 164, p. 496–511, 2018.

EPE. **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: www.epe.gov.br.

GRIMA-OLMEDO, C.; RAMÍREZ-GÓMEZ, A.; ALCALDE-CARTAGENA, R. Energetic performance of landfill and digester biogas in a domestic cooker. **Applied Energy**, v. 134, p. 301–308, 2014.

HACHE, E. renewable energies improve energy security in the long run? **International Economics**, v. 156, n. November 2017, p. 127–135, 2018.

HOLMA, A. *et al.* Environmental impacts and risks of the national renewable energy targets – A review and a qualitative case study from Finland. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. April 2017, p. 1433–1441, 2018.

RAJENDRAN, K. HARSHAVARDHAN R. K.; RAKEL M.; MOHAMMAD J. T.; Uncertainty over techno-economic potentials of biogas from municipal solid waste (MSW): A case study on an industrial process. **Applied Energy**, v. 125, p. 84–92, 2014.

SEMAN, S. Z. A. *et al.* Optimizing purity and recovery of biogas methane enrichment process in a closed landfill. **Renewable Energy**, v. 131, p. 1117–1127, 2019.

YORK, R.; BELL, E. S. Energy transitions or additions? Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy. **Energy Research & Social Science**, v. 51, n. November 2018, p. 40–43, 2019.

Capítulo 2: Estado da arte da biodigestão anaeróbia em reatores e técnicas de modelagem e simulação

2.1 Introdução

Os avanços das tecnologias de digestão anaeróbia (DA) vêm se tornando um grande suporte para afirmação do biogás como fontes renováveis de energia competitiva. Tanto o setor privado quanto o público têm visto o tratamento anaeróbio como um investimento sustentável com grandes expectativas econômicas. Dessa forma, é um desafio otimizar o rendimento energético dos biodigestores bem como de se reduzir os custos de implementação e operação deste sistema (Meister *et al.*, 2018; Stazi e Tomei, 2018).

A utilização da DA no tratamento de águas residuais domésticas também tem ganhado espaço nos sistemas de tratamento de esgoto. Quando a digestão anaeróbia é aplicada para tratamento do esgoto, os biodigestores promovem a minimização de impactos ambientais com reflexos à saúde pública, além da recuperação de recursos naturais com apoio à proteção agrícola-ambiental. Com o uso de biodigestores para tratamento de esgoto é possível que se recupere água, nutrientes naturais de fertilização, e diferentes formas de energia a partir do biogás (Stazi e Tomei, 2018).

Diversos países têm incentivado por meio de políticas públicas a implementação de diferentes fontes de energia renováveis, como o biogás. Alguns países, especialmente Alemanha, Itália, Espanha e França têm liderado a produção científica e tecnológica sobre o tema. A implementação de sistemas de biodigestão no mundo, tem se tornado uma oportunidade econômica que colabora com o desenvolvimento sustentável. Também a produção de patentes, nos últimos anos, pode ser vista com mais um indicador do crescimento da área. A Alemanha tem liderado a produção de patentes, sendo o país com o maior número de plantas de biogás em operação, em torno de 60% das unidades da Europa (EBA, 2017).

A liderança da Alemanha pode ser explicada devido a prioridade dada pelo país expressa por meio de políticas públicas de incentivo a fontes de energia sustentáveis, como as tarifas prêmio de energia elétrica (Silva, 2017). Em adição, subsídios são previstos em lei para o incentivo ao aproveitamento do biogás, não

somente para a instalação da planta que inclui processos de filtragem e aumento da concentração de biometano, bem como a sua operação.

Outro apoio para esse avanço da Alemanha são os investimentos em culturas energéticas para a produção de biogás, que normalmente não são subsidiados entre outros países, como a França. Cerca de 48% dos recursos destinados à produção de biogás na Alemanha são provenientes de culturas energéticas, já na França esse número cai para 8% (André, Paus e Ribeiro, 2018; Grando *et al.*, 2017). Devido aos acordos ambientais realizados na Europa, a rede de biodigestores anaeróbios de 14.000 sistemas tende a aumentar em 18 a 20 milhões de metros cúbicos até 2030, o que é equivalente a 3% do consumo de gás de todo continente (EBA, 2017).

Além disso, outros incentivos a melhorias da produção de biogás podem ser feitos, como investigação e estudo de processos de pré-tratamento do afluente (Muñoz *et al.*, 2015), inserção de aditivos no substrato (Arif, Liaquat e Adil, 2018) e inserção do biogás sob a forma de biometano na rede de gás natural. Também pesquisas tem sido feitas sobre a utilização do biogás em células a combustível, para utilização também motores estacionários ou em veículos (Grando *et al.*, 2017).

Um fator importante para o crescimento das fontes renováveis de energia é a presença de fortes instituições de apoio. Tais entidades possuem a função de gerenciar as formas de financiamento, as implementações de políticas de desenvolvimento e a busca pela maior eficiência das usinas de biogás e outras renováveis ascendentes. É muito importante que instituições especializadas assumam as políticas de fontes renováveis de energia, principalmente as fontes renováveis de energia não convencionais, como é o caso do biogás. Cerca de 85% dos países europeus, americanos e asiáticos que fazem parte da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OECD (do inglês *Organization for Economic Cooperation and Development*) possuem uma agência de energia consolidada responsável pelas fontes renováveis de energia e pela eficiência da energia elétrica. Já entre os países em desenvolvimento, como os da América do Sul e da Ásia (fora do OECD), somente cerca de 45% possuem tais agências e ainda na maioria das vezes são instituições com pouca expressão política e econômica (Melo, Jannuzzi e Bajay, 2016).

O Brasil se encontra neste segundo grupo, o que pode ser uma razão para o lento desenvolvimento nas fontes renováveis de energia não convencionais, como o biogás. Um exemplo é a antiga tecnologia dos modelos de biodigestores ainda empregados no Brasil. Além de serem modelos, em grande parte, de primeira geração, não se tem conhecimento de usinas de biogás automatizadas e controladas no Brasil.

Outro exemplo é a ausência de mais políticas públicas voltadas para a biomassa, o que poderia proporcionar incentivo ao uso do biogás. Atualmente existem apenas dois Planos voltados para a biomassa no Brasil: o Plano Nacional do Álcool, PROALCOOL, e o Plano Nacional do Biodiesel, PNB. Por outro lado, inexistente o Plano Nacional do Biogás, que poderia ser uma política de grande incentivo ao crescimento desta tecnologia. Ressaltando-se que, tanto o PROALCOOL, quanto o PNB abrangem a implementação de políticas públicas que envolvam desde os setores de produção de biomassa até as indústrias de transformação da biomassa e automotivas para consumo dos respectivos biocombustíveis (Silva, 2017).

Assim sendo, a investigação para aumentar o desempenho energético e a implementações de plantas de biogás no país é um grande desafio. É de grande importância um estudo sistemático dos novos modelos de reatores existentes, bem como, de tecnologia em desenvolvimento no mundo, a fim de adequá-los para aplicação no cenário brasileiro. Outra tendência é a automação dos sistemas de biogás, em diferentes tipos de reatores, principalmente o modelo de fluxo tubular, já em operação, como também nos que serão futuramente implementados (Barros, 2008; Melo, Jannuzzi e Bajay, 2016; Sahu *et al.*, 2017; Zieliński *et al.*, 2019).

2.2 Objetivos

Avaliar o estado da arte da modelagem e simulação da biodigestão anaeróbia em reatores em sistemas com e sem automação.

2.3 Material e Métodos

Foi realizado um estudo do estado da arte dos biodigestores no que se refere ao princípio de funcionamento, parâmetros da biodigestão e às principais tecnologias e métodos de simulação, controle e automação em diversos modelos de reatores. Utilizou-se informações das principais bases de artigos científicos, como *Science Direct* e *Springer*. A pesquisa foi direcionada aos estudos mais recentes relacionados aos parâmetros cruciais de simulação e controle da digestão anaeróbia, com objetivo de eficientizar os biodigestores. Porém foram encontrados, durante a pesquisa, outros aspectos relevantes relacionados aumento da produção de biogás e degradação da matéria orgânica, como o pré-tratamento do afluente e o pós-tratamento do biogás. Este capítulo apresenta os principais resultados desta análise de uma revisão dos conteúdos

2.4 Princípio de funcionamento de biodigestores

A biodigestão anaeróbia é um conjunto de reações químicas e bioquímicas, realizadas por microrganismos que degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio. Essas reações ocorrem de maneira sequencial - são denominadas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese - envolvendo bactérias hidrolíticas-fermentativas, acetogênicas produtoras de hidrogênio e *arqueas* metanogênicas (Madigou *et al.*, 2018).

A primeira dessas reações, i. e. hidrólise, na qual as bactérias hidrolíticas fermentativas têm o papel de converter materiais orgânicos complexos, como lipídios, carboidratos e proteínas, em compostos mais simples, por exemplo aminoácidos, ácidos graxos, álcoois. Após a hidrólise, ocorre a segunda reação, a acidogênese, durante a qual os compostos mais simples sofrem fermentação também por parte das bactérias hidrolíticas fermentativas. A velocidade destas reações está relacionada com a superfície de contato entre o digestato e as enzimas liberadas pelos microrganismos, bem como com a temperatura, pH.

A acetogênese, a terceira reação é realizada pelas bactérias acetogênicas, que são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados anteriormente na fase acidogênica. Nessa fase são gerados os ácidos graxos voláteis, sobretudo o ácido

acético. Os compostos gerados na terceira reação, são também denominados intermediários, sendo a base para a produção do metano pelas arqueas metanogênicas. Assim, a quarta e última reação (metanogênica) consome os ácidos orgânicos e o hidrogênio da fase acetogênica, formando o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) (Chernicharo, 1997; Tchobanoglous, Burton e Stensel, 1979).

A Figura 2.1 apresenta as rotas e os microrganismos envolvidos na biodigestão anaeróbia.

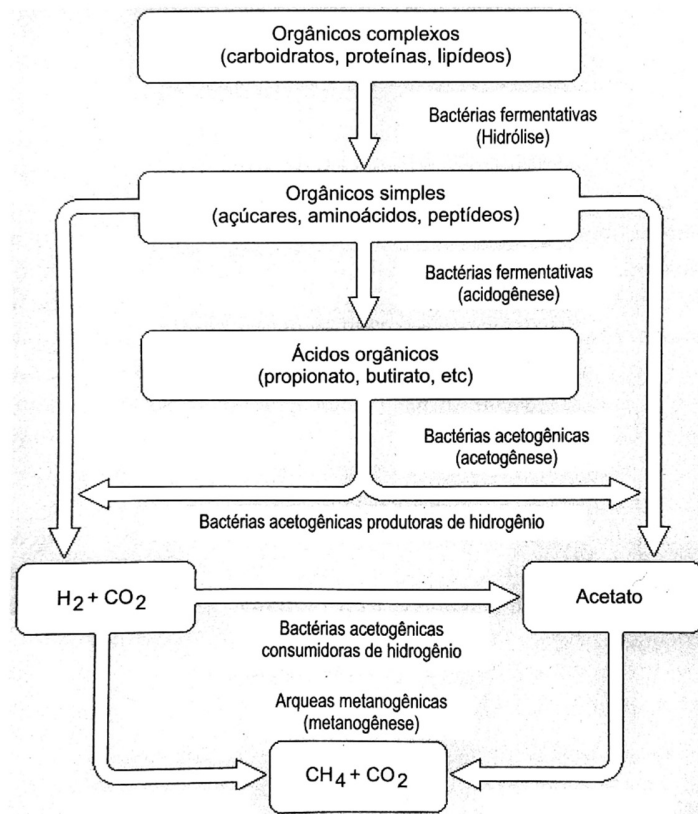


Figura 2.1 - Rotas metabólicas e grupos de microrganismos envolvidos na biodigestão anaeróbia (adaptado Chernicharo, 1997).

Vários fatores afetam estas reações químicas e bioquímicas. Os parâmetros que as influenciam podem ser: tipo de biomassa, temperatura, pH, tempo de retenção hidráulico e de sólidos e *design* do biodigestor. Esses parâmetros também podem influenciar o tempo de duração de cada reação, a quantidade, bem como, a qualidade do gás produzido (Barcelos, 2009).

Os reatores anaeróbios têm por função fornecerem condições próximas às ideais para a realização da biodigestão anaeróbia.

2.5 Parâmetros da biodigestão anaeróbia

Como pode ser notado, o funcionamento do biodigestor está submetido a muitos processos. Desta forma, é essencial controlar e investigar alguns parâmetros deste sistema.

A temperatura é um dos fatores mais significativos da DA (Khan e Martin, 2016). Segundo Cowley e Brorsen (2018), a eficiência na produção de biogás do biodigestor anaeróbio normalmente aumenta com a elevação da temperatura. Em alguns casos pode aumentar 100% a produção de biogás para cada aumento de 10 °C, entre as temperaturas de 15 e 35 °C (Cowley e Brorsen, 2018).

A temperatura também indica quais os tipos de microrganismos irão obter um melhor desempenho durante a operação no interior do biodigestor. Os microrganismos psicrófilicos, mesófilicos e termófilicos, possuem melhor desempenho nas faixas de temperaturas entre 15 e 25 °C, 35 e 40 °C e entre 50 e 60 °C, respectivamente (Arikan, Mulbry e Lansing, 2015).

Apesar dessa ampla faixa de temperatura para produção de metano por parte dos microrganismos, as *arqueas* mesófilicas são comumente indicadas para a produção de biogás a partir de resíduos animais, operando entre 35 e 37 °C. Isto pode ser devido ao processo mesófilico revelar-se mais estável, robusto, e exigir menor quantidade de energia para o aquecimento do que o uso de microrganismos termófilicos, e ainda, gerar menos odores. Por outro lado, as *arqueas* termófilicas possuem a características de produção de biogás com maior concentração de metano, além de possuírem maior taxa de degradação da matéria orgânica, (Sakar, Yetilmezsoy e Kocak, 2009). Acredita-se que a utilização de *arqueas* mesófilicas são as mais indicadas, pois estes microrganismos exigem menos energia para o aquecimento, sendo mais estáveis, apesar das termófilicas produzirem um gás de maior concentração de metano. Além do mais, a utilização das mesófilicas exigirão que se utilize no processo de produção de biogás técnicas de concentração de metano no biogás.

Em qualquer faixa de temperatura as *arqueas* possuem certa resistência à variação de temperatura, desde que a temperatura máxima de sobrevivência das mesmas não seja atingida. Apesar disso, quando a temperatura está abaixo da faixa ótima de produção de biogás em torno de 10°C a atividade dos microrganismos pode cair pela metade. O que comprova definitivamente que a temperatura afeta a taxa de crescimento bacteriano e a taxa de degradação da matéria orgânica, influenciando a quantidade e qualidade do gás produzido (Arikan, Mulbry e Lansing, 2015; Rajeshwari *et al.*, 2000; Tchobanoglous, Burton e Stensel, 1979).

Outra característica importante do biodigestor é o tempo em que o digestato irá permanecer no interior dele, ou seja, o Tempo de Retenção Hidráulica (T_{RH}) e o Tempo de Retenção de Sólidos (T_{RS}), também conhecido como tempo de residência celular.

É desejável que tanto o fluido quanto os microrganismos permaneçam no reator tempo suficiente para que seja atingida a degradação esperada. Sendo assim, quanto menor o “tempo de retenção do substrato”, ou de sólidos, para a degradação completa da biomassa, melhor é o rendimento do biodigestor. Porém é um desafio alcançar baixos T_{RH} e, ao mesmo tempo, altos T_{RS} . O T_{RS} é o tempo em que os microrganismos permanecem ativos no biodigestor. A relação de T_{RH} e T_{RS} denota a concentração de “alimento” para os microrganismos, pois, independentemente da temperatura, existe um limite na quantidade de biomassa que pode ser digerida pelas bactérias/*arqueas*. As reações que ocorrem dentro do digestor (hidrólise, fermentação, acetogênese e metanogênese) estão diretamente relacionadas ao T_{RH} e T_{RS} . Sendo assim, o efluente rejeitado se encontra estabilizado e sua quantidade é suficientemente inferior aos volumes descartados em sistemas aeróbios (Abbasi, Tauseef e Abbasi, 2012; Chernicharo, 1997; Cowley e Brorsen, 2018).

Nos biodigestores de “baixa taxa”, inclusive o tubular com manta plástica e os reatores de tanque continuamente agitados - C_{STR} 's, possuem o T_{RH} igual ao T_{RS} , pois não possuem mecanismos para reter os microrganismos. Já os reatores de “alta taxa” são providos de tecnologias de separação do efluente tratado e dos sólidos (microrganismos), nestes modelos o T_{RH} é menor que o T_{RS} , alguns casos

o T_{RS} pode ser até três vezes maior que o T_{RH} (Abbasi, Tauseef e Abbasi, 2012; Rajeshwari *et al.*, 2000).

A homogeneidade do digestato também é uma característica que vem ganhando cada vez mais importância entre as pesquisas desenvolvidas para a tecnologia de DA por influenciar a taxa de biodigestão, bem como a produção de biogás. Para se obter homogeneidade do fluido é necessário que haja mistura/agitação/recirculação do mesmo. Porém, também é um processo que necessita de controle, pois a agitação muito intensa pode perturbar a estabilidade do processo, bem como a metabolização da matéria orgânica por parte dos microrganismos e uma agitação muito lenta pode não alcançar os objetivos requisitados (Hulle, Van *et al.*, 2014).

O tipo de biomassa que abastece o reator também é de grande relevância, pois tanto a temperatura, quanto a agitação e o tempo de retenção são parâmetros que variam com o tipo de digestato da digestão anaeróbia. Tauseef, Abbasi e Abbasi (2013) realizaram um estudo associando o modelo do reator com o tipo de afluente adequado, considerando o tempo de retenção hidráulica, a temperatura, a quantidade de biogás produzida, a porcentagem de metano presente no biogás, o volume do biodigestor e a redução da carga orgânica. Os autores concluíram que os biodigestores anaeróbios, quando comparados aos aeróbios, produzem 90% menos quantidade de lodo e que se pode economizar cerca de 90% no volume do reator com a implementação de sistemas de leito expandido.

Muitos estudos estão sendo realizados a fim de investigar a produção de bioenergia a partir de diferentes tipos de resíduos. Dentre eles, resíduos agrícolas, agroindustriais, de estações de tratamento e esgoto, sólidos urbanos, orgânicos domésticos, incluindo resíduos alimentares como foi estudado em (Sen *et al.*, 2016) que indicaram um grande potencial dos resíduos alimentares (do inglês *food waste*) para produção de energia.

Outro tipo de biomassa com um alto crescimento de aplicação são as culturas energéticas, as quais representam 48 % do total de biomassa utilizada para a produção de biogás na Alemanha. Também pode afetar a eficiência da DA o tempo de armazenamento da biomassa antes do abastecimento do reator, a super ou desnutrição (bem como vacinação) dos animais, como a presença de antibióticos

que pode chegar inclusive a cessar o metabolismo dos microrganismos e a consequente produção de metano (EBA, 2017; Rajeshwari *et al.*, 2000; Sen *et al.*, 2016).

Uma tecnologia inovadora dos sistemas DA é a microaeração. Nos últimos anos tem se pesquisado sobre os benefícios de se injetar uma quantidade limitada de ar ou oxigênio durante as reações no interior do biodigestor, o que era comumente evitado devido aos efeitos negativos na metabolização das arqueas metanogênicas. Porém a microaeração tem mostrados vantagens como o aumento da reação hidrólise, contribuição para a estabilização do sistema e filtragem de alguns gases indesejáveis como o H₂S (sulfeto de hidrogênio) (Nguyen e Khanal, 2018).

Outros parâmetros importantes de se relacionar na DA são a quantidade de resíduos, volume do digestor, volumes de afluente e efluente, caracterização do substrato (valor de pH), composição do gás, distribuição espacial dos componentes orgânicos (diluição). Pesquisas recentes também têm apontado sobre a importância do uso de vapor para o pré-tratamento da biomassa a ser biodigerida e resfriamento do biogás produzido para minimizar perdas e vazamento.

Pode se alcançar também a melhoria na eficiência da biodigestão anaeróbia realizando alterações estruturais no sistema, como a adequada modificação no *design* do biodigestor, inserindo camadas de materiais sendo eles isolante ou não, e incorporando tecnologias operacionais aos reatores (Matheri *et al.*, 2018).

Porém é consenso entre muitos pesquisadores que a otimização da biodigestão anaeróbia depende de muitos fatores correlacionados, e não de fatores isolados entre si, o que implica na necessidade de estudos englobando todos os parâmetros em conjunto com a finalidade de melhorar a eficiência do sistema como todo.

2.6 Tipos de Biodigestores

A princípio pode se classificar os biodigestores como sendo de “baixa” e “alta taxa”. Os biodigestores podem ser eficientes, mas lentos ou velozes quanto a taxa de degradação da matéria orgânica. Os reatores de “baixa taxa” são aqueles clássicos, sem agitação, que possuem maiores tempo de retenção hidráulica para

que o substrato seja significativamente tratado. Exemplos de modelos de biodigestores de baixa taxa podem ser os modelos (Figura 2.2) (a) indiano; (b) chinês; (c) fossa séptica; lagoa anaeróbia e o (d) tubular com manta plástica (Abbasi, Tauseef e Abbasi, 2012).

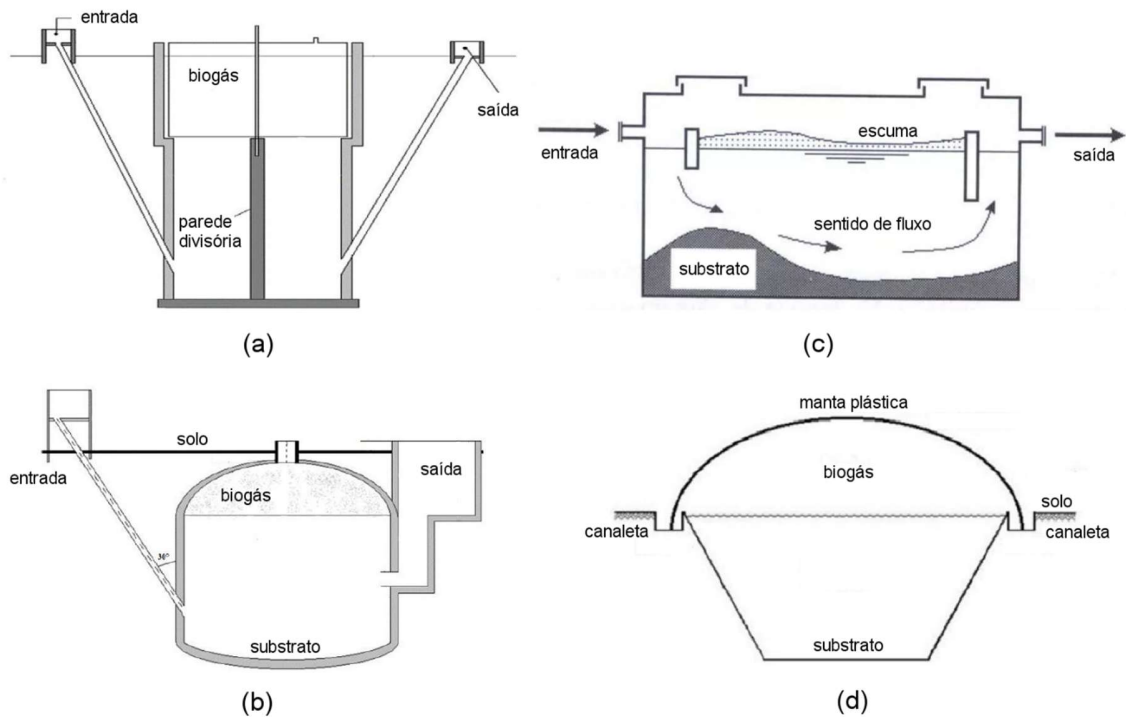


Figura 2.2 - Biodigestores de baixa modelos (a) indiano; (b) chinês; (c) fossa séptica; e (d) tubular com manta plástica taxa (adaptado Chernicharo, 1997).

O biodigestor tubular de manta plástica, conhecido também como modelo canadense, ou do inglês *plug-flow*, é o modelo mais utilizado no Brasil. A manta plástica inferior é aterrada em formato meio cilindro armazena a biomassa ser digerida. A manta superior de mesmo formato, armazena o biogás produzido e recebe calor da radiação solar que aumenta a velocidade da fermentação, contribuindo como agente catalizador para o processo (Cervi, Esperancini e Bueno, 2010).

É comum que biodigestores de “baixa taxa” sejam alimentados em regime de bateladas, que consiste no reator receber uma carga única de biomassa, e após

passar pelo processo de fermentação, ser descarregado por completo. Esse modelo é adequado para resíduos de granjas de aves. Pois em granjas, as aves são alimentadas até atingir uma idade de abate, nesta fase são removidas do galinheiro e levadas ao abatedouro. Após 2 ou 3 ciclos de produção de aves, a biomassa é coletada e inserida no biodigestor. Ocorre então a fermentação anaeróbia. O processo se repete após a reposição de novas aves nos galinheiros (Souza e Campos, 2007; Souza, 2010).

O biodigestor BioKöhler, que é desenvolvido por uma empresa brasileira, consiste em um reservatório de fermentação que é produzido em fibra de vidro, este modelo se assemelha ao internacionalmente conhecido digestor anaeróbio *up-flow*. Este modelo possui uma entrada de biomassa, fermentador, funil de separação, saída de biofertilizantes e válvula de gás. O formato é o de um barril, parte do reservatório é subterrânea e a outra parte fica exposta a radiação solar melhorando o processo de fermentação (Utech *et al.*, 2017). Este modelo tem sido criticado quanto ao volume máximo disponível não exceder 50 m³, já os tubulares podem exceder em muito esta quantidade.

Tais modelos de “baixa taxa” foram considerados lentos e ineficientes para tratamento de diversos tipos de resíduos, principalmente de águas residuárias, sua participação mais expressiva foi e é na estabilização de resíduos da produção animal.

Já os processos de anaeróbios de “alta taxa” surgiram com a implementação de sistema de agitação em biodigestores no formato de tanques, são conhecidos como reator de tanque agitado continuamente – C_{STR} (do inglês *Continuously Stirred Tank Reactor*). Com a agitação é obtido uma melhor eficiência dos reatores, quando comparados aos modelos de “baixa taxa”, porém ainda acusavam a igual desvantagem, de desperdiçar parte da população dos microrganismos ainda em atividade metabólica no efluente. Esse foi o primeiro passo para o desenvolvimento de reatores de “alta taxa”, que foram denominados de primeira geração (Figura 2.3).

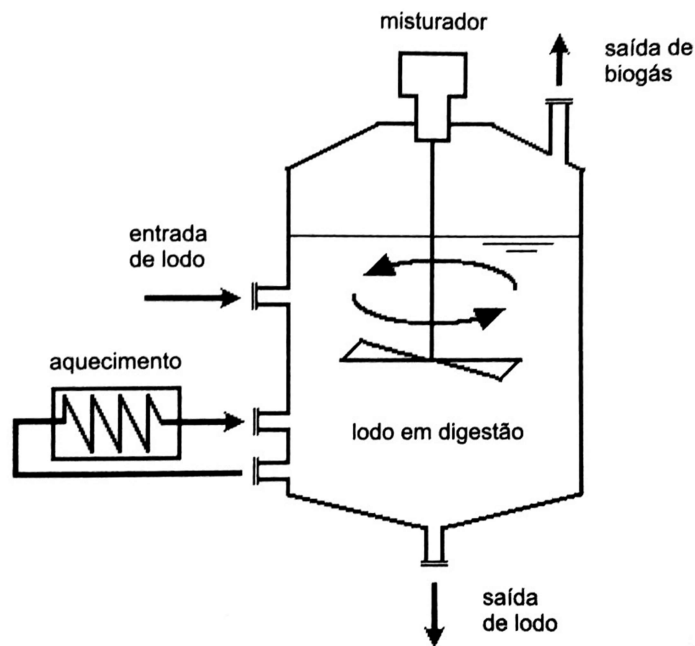


Figura 2.3 - Representação esquemática de um biodigestor de alta taxa de primeira geração (adaptado Chernicharo, 1997).

Os reatores de segunda geração foram surgindo a partir da necessidade de tornar os biodigestores de primeira geração mais eficientes. A classificação desses modelos de biodigestores pode ser feita: pela ótima degradação de determinados tipos de biomassa (i. e. modelos que são mais eficientes na digestão de resíduos de laticínios e cervejarias); pela forma de alimentação (i. e. fluxo contínuo, por batelada, ascendente ou descendente); pelo tempo de retenção hidráulica (T_{RH}); e pela facilidade de implementação de sistemas de automação e controle. Dentre os modelos de reatores de “alta taxa” pode se citar alguns:

- (i) Filtro anaeróbio;
- (ii) Reator de leito fixo com fluxo descendente - D_{SFF} (do inglês *Downflow Stationary Fixed Film*);
- (iii) Digestor anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo - U_{ASB} (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*);
- (iv) Reator anaeróbio de leito fluidificado - A_{FBR} (do inglês *Anaerobic Fluidized-Bed Reactor*);

- (v) Reator anaeróbio de leito expandido - A_{EBR} (do inglês *Anaerobic Expanded-Bed Reactor*);
- (vi) Reator anaeróbio compartimentado - A_{BR} (do inglês *Anaerobic baffled reactor*).

Como exemplo mais conhecido de biodigestor de leito fixo, tem-se os filtros anaeróbios. Na Figura 2.4 pode-se observar a representação esquemática de filtro anaeróbio leito fixo com (a) fluxo ascendente e (b) fluxo descendente.

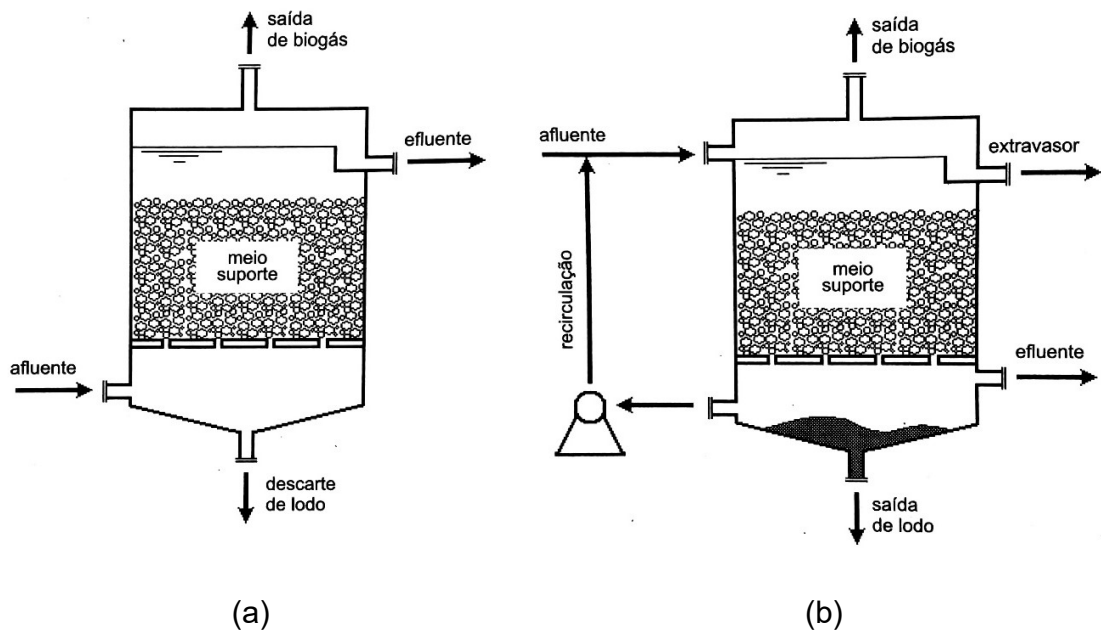


Figura 2.4 - Representação esquemática de filtro anaeróbio leito fixo com (a) fluxo ascendente e (b) fluxo descendente, (adaptado Chernicharo, 1997).

Os modelos de biodigestores de leito expandido e fluidificado possuem como vantagens, entre os outros biodigestores dessa geração, a possibilidade de reduzir e até eliminar entupimentos. Este tipo de reator também pode aumentar substancialmente o tempo de retenção da biomassa podendo diminuir o tempo de retenção hidráulica. A Figura 2.5 apresenta a representação esquemática do reator anaeróbio de leito expandido/fluidificado (Chernicharo, 1997).

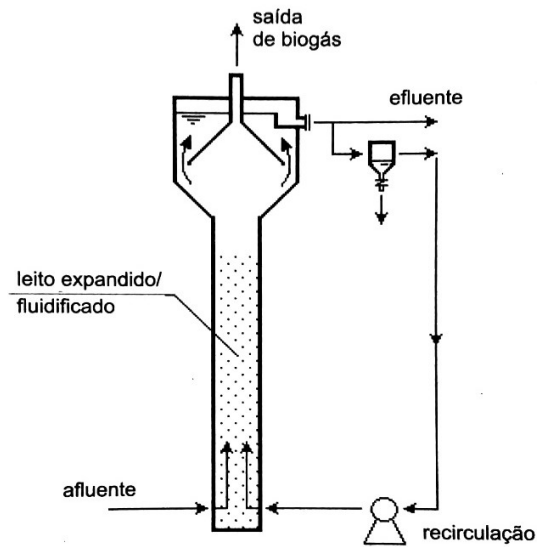


Figura 2.5 - Representação esquemática do reator anaeróbico de leito expandido/fluidificado (adaptado Chernicharo, 1997).

Na Figura 2.6 tem-se representação esquemática do reator anaeróbico compartimentado, ou de chicanas. Este tipo de reator apresenta muitas das vantagens de reatores que possuem agitação como o UASB, além de variadas formas de construção, como maior ou menor profundidade enterrado ou não, o que poder reduzir gastos com operação e implementação (Chernicharo, 1997).

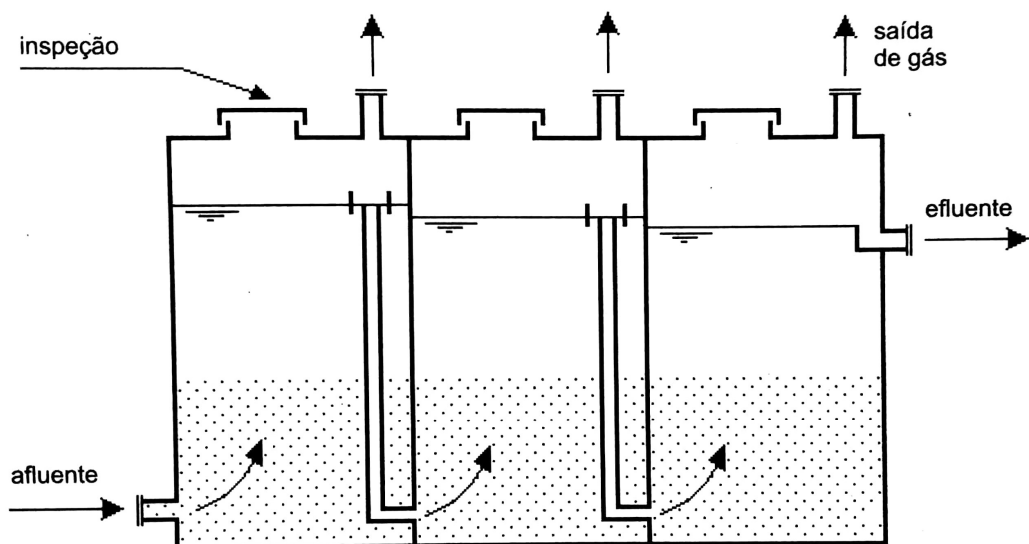


Figura 2.6 - Representação esquemática de biodigestor anaeróbico compartimentado (adaptado Chernicharo, 1997).

Porém mesmo entre os modelos de segunda geração havia limitações a serem superadas, como por exemplo, acúmulo de resíduos sólidos no interior do biodigestor que com o passar do tempo causavam entupimento e por fim, a parada do sistema, desperdício do efluente ainda com carga orgânica significativa, incompatibilidade de alguns tipos de biomassa. Essas restrições incentivaram o desenvolvimento da próxima geração (Tauseef, Abbasi e Abbasi, 2013).

Por fim, surgiram os reatores de “alta taxa” de terceira geração, que compreendem no refinamento dos modelos da segunda geração. Os mais significativos estudos foram em torno do U_{ASB} , tornando-o o modelo de D_A de maior aplicação (Gorrindo *et al.*, 2013; Kovacik *et al.*, 2010; Rastegar *et al.*, 2011).

Em um estudo realizado por Van Lier (2008), cerca de 90% dos biodigestores em operação para o período estudado eram de diferentes versões do modelo U_{ASB} . Dentro dos desenvolvimentos tecnológicos ocorridos neste modelo podem se citar os reatores de: manta de lodo granular expandido - E_{GSB} (do inglês *Expanded Granular Sludge Blanket reactor*), circulação interna - I_C (do inglês *Internal Circulation reactor*), manta migratória anaeróbia - A_{MBR} (do inglês *Anaerobic Migrating Blanket Reactor*), e eletrólise melhorada - E_{EAD} (do inglês *Electrolysis Enhanced Anaerobic Digestion*). Cerca de 72% dos modelos de biodigestores anaeróbios em operação no mundo, são do tipo U_{ASB} com o desenvolvimento tecnológico do tipo E_{GSB} . Pode-se observar na Figura 2.7 representação esquemática dos modelos (a) U_{ASB} e (b) E_{GSB} .

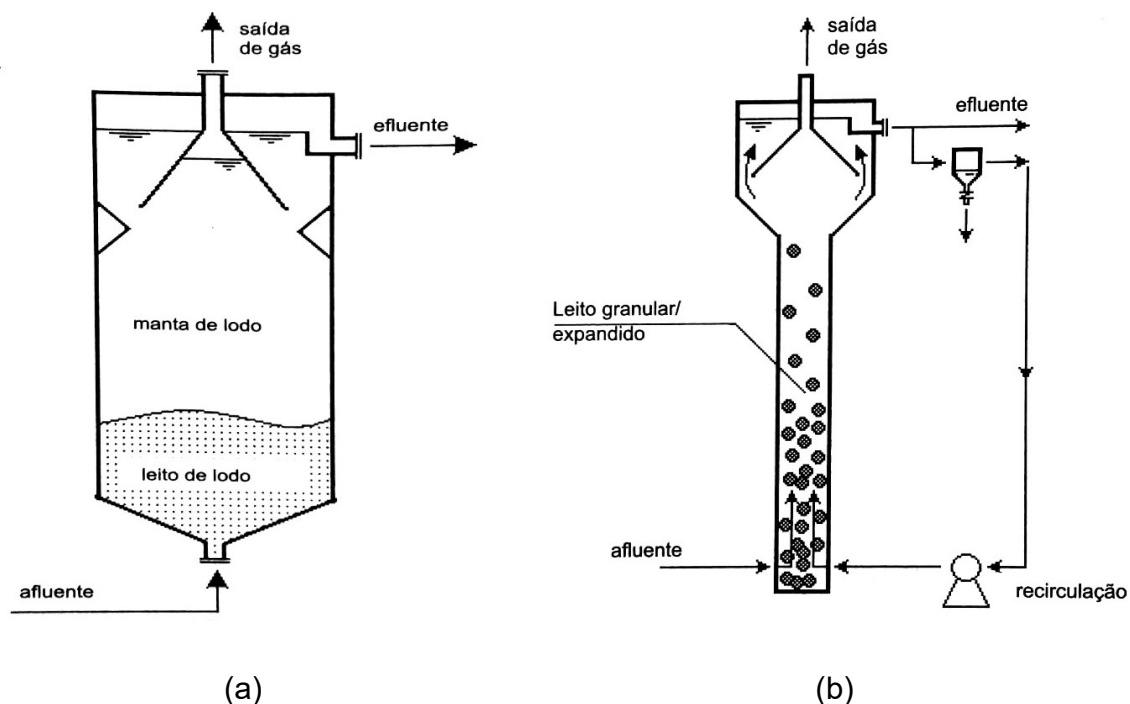


Figura 2.7 - Representação esquemática de biodigestores anaeróbios (a) de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) e (b) de leito granular expandido (EGSB) (adaptado Chernicharo, 1997).

A última categoria é dos modelos de reatores anaeróbios híbridos, que é a integração de tecnologias de biodigestores anaeróbios de diferentes gerações.

Tauseef, Abbasi e Abbasi (2013) realizaram um estudo avaliando o modelo do reator com o tipo de aflente adequado, considerando o tempo de retenção hidráulica, a quantidade de biogás produzida, a porcentagem de metano presente no biogás, o volume do biodigestor, a redução da carga orgânica e a temperatura.

Visto estes modelos de reatores, seus avanços tecnológicos e a maior eficiência dos modelos mais recentes quando comparados aos tradicionais, como os de “baixa taxa”. É interessante refletir as razões do Brasil e alguns outros países permanecerem com a maioria de suas plantas de biogás com os modelos menos eficientes, como o biodigestor tubular de manta plástica (Appels *et al.*, 2008).

Essa decisão pode ser explicada pela inviabilidade dos reatores, por exemplo de “alta taxa”, para operações em pequenas escalas. Além disso, os reatores mais desenvolvidos necessitam de uma maior e rigorosa supervisão técnica do que aos

sistemas de “baixo custo”. A degradação de matéria orgânica no meio rural e em meios suburbanos é descentralizada e na maioria das vezes em pequena escala. Desta forma, os biodigestores de “baixa taxa” se tornam economicamente viáveis mesmo quando operando com menores eficiências. Há de lembrar também que no caso brasileiro, a maioria dos biodigestores tem sido construída para atender a legislação ambiental e não para produzir o biogás. O biogás aqui passa a ser um subproduto ou externalidade positiva da ação de biodigestão, ou seja, uma maior eficiência na produção de biogás não é o objetivo.

A realização de leilões de energia elétrica no Brasil, para incentivar a geração proveniente de fontes renováveis, tem atraído a atenção da comunidade acadêmica internacional. A princípio, estes leilões comercializavam apenas a energia gerada nas usinas hidrelétricas. Atualmente, já se incluem nos leilões os sistemas de geração eólico, fotovoltaico e de biomassa, este último qual representa participação significativamente menor dentre os demais. Com o rápido aumento na utilização de energia eólica e solar fotovoltaica, muitos investidores têm ignorado o potencial financeiro, energético e ambiental da biomassa. Acredita-se que as vantagens provenientes do uso de biodigestores possam atrair investimento para este setor (Bradshaw e Martino Jannuzzi, de, 2019).

Consequentemente, continuará a existir aplicação tanto para reatores do tipo de “baixa” quanto para os de “alta taxa”. É evidente que os biodigestores de “alta taxa” continuarão a se desenvolver tecnologicamente. Igualmente, também é necessário investigar formas de melhorar a eficiência dos modelos de “baixa taxa” existentes, em busca de inovações econômica e energeticamente viáveis.

2.7 Tecnologias para simulação de biodigestores

Se tornou muito recorrente a utilização de modelos computacionais para avaliar e otimizar o desempenho de sistemas de biodigestores anaeróbios. A modelagem vem sendo aplicada em todas as etapas da biodigestão anaeróbia, desde simulações para realização de testes do *design* dos biodigestores (Leonzio, 2018) até em métodos de filtragem do biogás produzido (Zhuo *et al.*, 2019).

A diversidade de parâmetros da biodigestão além das diversas técnicas de melhoria do sistema, torna inviável a realização de testes em escala real dos

biodigestores, há muitos estudos de experimentos práticos, porém, grande parte deles em escala laboratorial (Stazi e Tomei, 2018).

Neste contexto a utilização de simulações para caracterizar o comportamento de sistemas anaeróbios vem se tornando uma opção vantajosa. Por meio de simulações é possível realizar estudos em modelos de tamanho real dos sistemas e com o desenvolvimento dos *softwares* as simulações representam cada vez melhor a realidade. Como as simulações podem avaliar um número muito grande de situações, apenas os melhores resultados são testados experimentalmente em escalas piloto, laboratorial e em tamanho real, economizando assim esforços de mão de obra e materiais.

A possibilidade de haver comunicação entre diferentes tipos de *softwares* é outra vantagem dos sistemas computacionais quando comparados a experimentos práticos. Uma vez que é inviável investir em tecnologias para melhorar a eficiência de reatores, sem a confiabilidade de atingir os objetivos esperados. Badr, Mohammed e Azddine (2017) e Gunjo, Mahanta e Robi (2017) realizaram simulações com o objetivo de avaliar a integração de biodigestores anaeróbios com sistema térmico de energia solar, para aquecimento do substrato da DA nas cidades Kenitra (Marrocos) e Guwahati (Índia). No primeiro estudo conclui-se que 90% das necessidades do biodigestor foram atendidas para todo o ano e 70% para o período de inverno. Já Gunjo, Mahanta e Robi (2017) além de modelar ambos os sistemas e avaliaram a eficiência do coletor solar acoplado ao biodigestor, também validaram os resultados com dados experimentais obtendo um erro relativo máximo entre 5,4% e 2,0%.

O *Energy-Plus Building Simulation and Software* 6.0 e no *OpenStudio* 3.0.0, foi utilizado com intuito de avaliar o comportamento da temperatura de um biodigestor modelo chinês, com e sem a presença de uma estufa térmica isolando das variações da temperatura externa. O *EPlus* é um *software* utilizado mundialmente tanto por pesquisadores, quanto engenheiros e arquitetos para a simulação e análise de sistemas de aquecimento, iluminação, refrigeração, ventilação e outros fluxos de energia. Além de possuir recursos avançados, que foram testados de acordo com métodos referidos pela IEA - Agência Internacional de Energia (do inglês *International Energy Agency*). Por exemplo, ampla variação

do passo de tempo (do inglês *time-stepping*), ventilação natural e sistemas de energia solar térmica e fotovoltaica. Os autores concluíram que na ausência da estufa, os biodigestores não alcançaram a temperatura mínima para produção contínua de biogás sem um sistema externo de aquecimento (Hassanein *et al.*, 2015).

Pode se observar que a simulação permite avaliar sistemas integrados e também ambos separadamente. Essa possibilidade aumenta as variáveis de análise da pesquisa, contribuindo assim para maiores chances de se eficientizar os objetos de estudo.

A agitação tem sido um parâmetro de interesse comum entre os pesquisadores de reatores. Leonzio (2018) realizou um estudo de um sistema de agitação, constituído por bombas para a recirculação do líquido, aplicado a três tipos de biodigestores. O autor utilizou o *software* COMSOL *Multiphysics*™ 4.2, para as simulações e avaliou qual dos três casos foi o mais viável econômica e energeticamente. Já Meister *et al.* (2018) analisaram diferentes sistemas de agitação em dois modelos de biodigestores. As simulações foram realizadas no *software* ANSYS *Fluent* 16.2, ou autores comparam diferentes modelos de hélices para a agitação bem como os efeitos da adição de um sistema de recirculação bombeada do digestato e concluíram que operando com ambos sistemas de agitação se alcançou o melhor nível de mistura, por outro lado, o escoamento perdeu a simetria axial.

Mohammadrezaei, Zareei e Khazaei (2018) também utilizaram dinâmica dos fluidos computacional – CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*) por meio do *software* ANSYS *Fluent* 15 para a análise de diferentes intensidades de rotação para o sistema de agitação de um biodigestor alimentado por resíduos bovinos. Entre os valores de rotação de 40, 80 e 120 rpm, os resultados indicaram que a velocidade de 80 rpm obteve maior produção de biogás.

Foi realizado um estudo de modelagem de um biodigestor tubular aterrado para o clima de Cusco, Peru. Foi utilizada uma estufa envolvendo a parte acima do solo do biodigestor e uma camada isolante de palha entre o biodigestor e o solo, com objetivo de isolar o substrato das grandes variações da temperatura do ar ambiente (em média 16,1 °C para o período de estudo). O estudo alcançou seus

objetivos mantendo a temperatura do substrato 8,4 °C acima da temperatura ambiente e os resultados foram validados com erro absoluto de 0,47 °C (Perrigault *et al.*, 2012). Liu *et al.* (2017) também simularam um modelo subterrâneo, mas com um sistema de aquecimento controlado a temperatura de 35 °C. Também foi modelado pelos autores o comportamento térmico do solo e a inserção de um material isolante. Esta inserção resultou na redução de 67,1 % das perdas de calor para o solo.

Tendo como base estas pesquisas, pode se observar que uso de ferramentas computacionais possui a flexibilidade de se poder simular muitas variáveis de estudo e de realizar análises aprofundadas para otimizar cada parâmetro específico. Por exemplo não se pode afirmar que quanto maior a agitação maior a produção de biogás, como foi comprovado por Mohammadrezaei, Zareei e Khazaei (2018).

Também se avaliou o sistema de agitação de um reator modelo *plug-flow* não aterrados, por meio de CFD utilizando o *software Fluent* 6.3. Os autores validaram a simulação com dados experimentais e os resultados indicaram que a intensidade da mistura influenciou a fase gasosa modelada acima da superfície fluida (Rasouli *et al.*, 2018).

Há estudos também envolvendo as características reológicas do substrato como fluido e as trocas térmicas das reações dos microrganismos que ocorrem durante a digestão anaeróbia (DA). Como é de conhecimento geral, os biodigestores podem ser abastecidos por diversos tipos de biomassa, com diferentes características físicas e químicas. Desta forma é importante a caracterização do fluido de acordo com a biomassa a ser avaliada (Bridgeman, Jefferson e Parsons, 2010; Sajjadi *et al.*, 2016; Wu, 2011). Por outro lado, há autores com trabalhos de igual relevância que consideraram o comportamento do digestato próximo ou igual ao da água (Axaopoulos *et al.*, 2002; Bradshaw e Martino Jannuzzi, de, 2019; Gunjo, Mahanta e Robi, 2017; Perrigault *et al.*, 2012). Já López-jiménez *et al.*, (2015) e Meister *et al.*, (2018) realizaram simulações com as duas abordagens, tomando o substrato como um fluido newtoniano e não-newtoniano e com variações na concentração de sólidos totais.

As pesquisas utilizando simulações em reatores anaeróbios abrangem diversas variáveis, contribuindo para a otimização desses sistemas e para o avanço das tecnologias desta fonte de energia sustentável.

2.8 Tecnologias para monitoramento e controle de biodigestores

Nos meados dos anos 90, a principal razão para o fechamento de plantas de biogás era a baixa produção de gás aliada à baixa lucratividade. Outra notável desvantagem era a alta taxa de ocorrências de falhas deste sistema, cerca de 50% do total de plantas no período sofriam de paradas inesperadas devido as estas falhas. O que representava projetos ineficazes e altos custos de manutenção dos biodigestores (Lusk e Wiselogle, 1998). Isto gerou questionamentos sobre a viabilidade econômica e energética dessa fonte de energia renovável, embora possua vantagens irrefutáveis (Nguyen *et al.*, 2015).

Segundo Wiese e Haeck (2006) a diminuição na produção de biogás pode gerar altos prejuízos a uma usina. A redução de 10% no rendimento de produção de biogás nos EUA, deixaria de gerar cerca de 500 kW de energia elétrica, o que implicaria num prejuízo de 11% na receita anual.

As dúvidas quanto à eficácia do processo de digestão anaeróbia foram se dissolvendo à medida que tecnologias de melhorias foram sendo desenvolvidas.

A implementação de um sistema de automação e controle, permitiu que falhas dos sistemas de digestão anaeróbia minimizassem, pois, a estabilidade do sistema foi alcançada mais rapidamente. Disto, tem-se o principal objetivo do controle de um biodigestor: operação estável na capacidade máxima. O sistema automático de reatores consiste em monitoramento dos parâmetros mais sensíveis a perturbações e utilização de estratégias para controlá-los.

O monitoramento pode ser feito de forma automatizada ou não. Pode-se realizar uma coleta de dados de forma automática e utilizar tecnologias para se atuar nos biodigestores. Ou então, realizar um monitoramento manual, utilizando-se de um operador do sistema, realizando medições e atuando (Friehe, Weiland e Schattauer, 2010).

Há também dispositivos cromatográficos e espectroscópicos, que foram desenvolvidos para monitorar parâmetros no interior dos biodigestores. A técnica

espectroscópica é não invasiva, ou seja, não se danifica a amostra ao monitorá-la além de conseguir medir um maior número de parâmetros do que a técnica cromatográfica. Tem-se conhecimento da aplicação de diversos tipos de controladores, desde as mais simples como *on/off* até os mais complexos, como redes neurais.

Dentre as muitas estratégias de controle utilizadas nas plantas de digestão anaeróbia, podem se destacar:

(i) **CONTROLE ON/OFF:** possui vantagens de ser um tipo simples de controle e econômica, apropriado para aplicação com válvulas e bombas, por outro lado possui limitação com sistemas de comportamento dinâmico e em regime permanente de malha fechada.

(ii) **CONTROLE PID (PROPORCIONAL INTEGRAL E DERIVATIVO):** O controle PID consiste no algoritmo que é baseado no erro atual (proporcional), passado (integral) e futuro (derivativo) (Åström e Hägglund, 2001). Sua aplicação para processos de digestão anaeróbia pode ser feita de forma simples eficaz ao mesmo tempo;

(iii) **CONTROLE ADAPTATIVO:** com este tipo de controle é possível ajustar os parâmetros do sistema automaticamente, baseando-se no modelo dinâmico do processo, visando adaptar variações deste sistema. O controle adaptativo é ideal para aplicação em sistemas não-lineares, como pode ser o caso de uma planta de biogás, no entanto, requer informações detalhadas do sistema para a modelagem, a fim de se fazer a identificação de sistemas (Bernard et al., 2001). Assim, se poderá conhecer a função de transferência entre a(s) entrada(s) e saída(s), etapa fundamental para a implementação do controle;

(iv) **CONTROLE POR LÓGICA DIFUSA:** diferentemente dos outros tipos de controle não é operado com relação à dados de monitoramento. As tomadas de decisões no controle por lógica difusa são baseadas no conhecimento dos operadores. Além de ser aplicado em sistemas não-lineares/dinâmicos possui múltiplas entradas/saídas, por outro lado possui uma grande dependência do conhecimento do operador no sistema ou da aplicação do algoritmo descrito.

(v) **CONTROLE POR REDES NEURAIS ARTIFICIAIS:** consiste numa estrutura de multicamadas interligadas por nós de várias maneiras (como os neurônios do cérebro humano). As entradas para essas camadas são de dados de

monitoramento do sistema a ser controlado e então gerar sinais de saídas nos nós das camadas de saída. A rede neural é “treinada” pela ponderação das informações recebidas nos nós de entrada, nesta etapa a rede neural recebe o treinamento para entender os parâmetros de operação do processo. Sua aplicação para sistemas de DA é indicada quanto há um amplo conjunto de dados dos parâmetros de entrada e saída da planta, mesmo quando seu comportamento interno não é completamente conhecido (Nguyen et al., 2015).

Mesmo com diferentes tipos e tecnologias para a aplicação de automação e controle nos biodigestores, altos investimentos iniciais, custos com dispositivos de alta tecnologia e treinamentos de operadores, tem afastado no Brasil o interesse da adoção destes sistemas.

Porém é esperado que com o crescente avanço da tecnologia eletrônica e computacional os custos para implementação e operação de sistemas de controles diminuam. Desta forma, o número de usinas de biogás controladas poderá aumentar bem como a sua eficiência. Neste mesmo contexto poderá crescer também o número de plantas de biogás de pequena escala com automação e/ou algum tipo de controle, que atualmente é ínfimo, no Brasil.

Questiona-se aqui o porquê de não se ter no Brasil esta nova geração de biodigestores automatizados. Seria o tamanho médio das unidades, ou legislação mais restritiva, ou seriam políticas públicas favoráveis mais agressivas ou todas as alternativas citadas?

2.9 Conclusão

O conhecimento do princípio de funcionamento geral e das variáveis do processo de digestão anaeróbia é fundamental para a aplicação de qualquer tipo de tecnologia neste sistema. A caracterização dos parâmetros da digestão anaeróbia, bem como o conhecimento da relação entre eles, são os passos iniciais tanto no emprego de estratégias de controle e automação quanto no desenvolvimento de modelagem para a simulação do balanço de energia visando otimização operacional dos biodigestores.

Com base nas informações fornecidas nesta revisão, pode-se concluir que tanto os modelos de biodigestores de “baixa taxa” quanto os de “alta taxa” têm sua

importância tanto no tratamento de resíduos quanto na geração de biofertilizante e de energia. Além disso, ambas as tecnologias possuem grande potencial de avançar e se tornaram mais eficientes.

A simulação tem sido amplamente utilizada como forma de pesquisa em biodigestores anaeróbios. O rápido desenvolvimento da ciência da computação contribuiu para a diminuição de custos de *hardwares*, *softwares* e também de tempo de processamento. No entanto, o crescente avanço das tecnologias dos reatores tem elevado o nível dos requisitos de simulação, principalmente em sistemas de agitação. Se por um lado, é verdade que a simulação de processos evita investimentos em um número muito grande de situações e/ou experimentos, de outro deve-se limitar o seu uso devido à complexidade de implementação.

Até onde se tem conhecimento são inexistentes artigos científicos publicados de trabalhos experimentais de biodigestores anaeróbios em escala industrial. Os trabalhos realizados em sua grande maioria são em protótipos de digestores e/ou em escala ainda menores a nível de laboratório. Diante dessas limitações as simulações computacionais vêm se mostrando mais aplicáveis e também mais viáveis tanto em tempo de retorno de resultados quanto em menores investimentos para avanço da tecnologia em DA.

A Dinâmica dos Fluidos Computacional tem liderado e contribuído com a simulação e conseqüentemente com o desenvolvimento dos biodigestores e a expectativa é que ambas as tecnologias avancem simultaneamente.

Pode se verificar que há um número significativo de estudos sobre a automação dos sistemas de biodigestão, porém ainda é pouco expressiva a quantidade de trabalhos que abordem sobre esta tecnologia em modelos aplicados nas suinoculturas brasileiras (modelo tubular). A automatização torna o sistema mais eficiente, por outro lado o torna mais complexo. Porém baseando-se nas diferentes estratégias de controle abordadas, pode se realizar a automação tanto parcial quanto integral dos sistemas como citado em alguns trabalhos da revisão.

Desta forma foi possível tomar conhecimento de novas ferramentas para a otimização de diversos modelos de biodigestores e por diferentes caminhos, ampliando as opções para se eficientizar esta fonte de energia renovável que vem ganhando cada vez mais espaço especialmente pela característica “despoluidora”.

2.10 Referências bibliográficas

ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3228–3242, 2012.

ANDRÉ, L.; PAUSS, A.; RIBEIRO, T. Solid anaerobic digestion: State-of-art, scientific and technological hurdles. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1027–1037, 2018.

APPELS, L. JAN, B.; JAN, D.; RAF, D. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, n. 6, p. 755–781, 2008.

ARIF, S.; LIAQUAT, R.; ADIL, M. Applications of materials as additives in anaerobic digestion technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, n. January 2017, p. 354–366, 2018.

ARIKAN, O. A.; MULBRY, W.; LANSING, S. Effect of temperature on methane production from field-scale anaerobic digesters treating dairy manure. **Waste Management**, v. 43, p. 108–113, 2015.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. The future of PID control. **Control Engineering Practice**, v. 9, n. 11, p. 1163–1175, 2001.

AXAOPOULOS, P. *et al.* Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester. **Fuel and Energy Abstracts**, v. 43, n. 2, p. 123, 2002.

BARCELOS, B. R. Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos. Orientadora: Ariuska Karla Barbosa Amorim. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental E Recursos Hídricos. 2009.

BARROS, T. D. **Árvore do Conhecimento: Biodigestor Tubular**. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fj06suh302wyiv802hvm3ja3fm10a.html#>>. Acesso em: 24 jan. 2019.

BERNARD, O.; POLIT, M.; HADJ-SADOK, Z.; PENGGOV, M.; DOCHAIN, D.; ESTABEN, M.; LABAT, P. Advanced monitoring and control of anaerobic wastewater treatment plants: software sensors and controllers for an anaerobic digester. **Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 43, n. 7, p. 175–82, 2001.

BRADSHAW, A.; MARTINO JANNUZZI, G. Governing energy transitions and regional economic development: Evidence from three Brazilian states. **Energy Policy**, v. 126, p. 1–11, mar. 2019.

BRIDGEMAN, J.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S. A. The development and application of CFD models for water treatment flocculators. **Advances in Engineering Software**, v. 41, n. 1, p. 99–109, 2010.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. C. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suínica para geração de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 831–844, 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte, MG - Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997.

COWLEY, C.; BRORSEN, B. W. Anaerobic Digester Production and Cost Functions. **Ecological Economics**, v. 152, n. June, p. 347–357, 2018.

EBA, E. B. A. **EBA Biogas Report 2017**. Brussels, Belgium: [s.n.]. Disponível em:

<<http://european-biogas.eu/2017/12/14/eba-statistical-report-2017-published-soon/>>.

FREITAS, F. F.; SOUZA S. S.; FERREIRA L. R. A.; OTTO RB, ALESSIO FJ, SOUZA SNM; et al. The Brazilian Market of Distributed Biogas Generation: Overview, Technological Development and Case Study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146-57, 2018.

FRIEHE, J.; WEILAND, P.; SCHATTAUER, A. **Fundamentals of anaerobic digestion: guide to biogas from production to use**. F. Eschborn, Germany: [s.n.].

GRANDO, R. L. *et al.* Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 4–53, 2017.

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

HULLE, S. W. H. VAN *et al.* Importance of scale and hydrodynamics for modeling anaerobic digester performance. **Chemical Engineering Journal**, v. 255, p. 71–77, 2014.

KHAN, E. U.; MARTIN, A. R. Review of biogas digester technology in rural Bangladesh. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 247–259, 2016.

KOVACIK, W. P. *et al.* Microbial dynamics in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) bioreactor granules in response to short-term changes in substrate feed. **Microbiology**, v. 156, n. 8, p. 2418–2427, 2010.

LATIF M.A.; AHMAD, A.; GHUFRAN, R., and WAHID, Z.A. Simulation-based ongoing professional practice evaluation in psychiatry: A novel tool for performance assessment. **Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety**, v. 39, n. 7, p. 319–323, 2013.

LEONZIO, G. Study of mixing systems and geometric configurations for anaerobic digesters using CFD analysis. **Renewable Energy**, v. 123, p. 578–589, 2018.

LIER, J. B. VAN. High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques. **Water Science & Technology**, v. 57, n. 8, p. 1137-0048, 2008.

LIU, G.; BAO, J. Evaluation of Electricity Generation from Lignin Residue and Biogas in Cellulosic Ethanol Production. **Bioresource Technology**, v. 243, p. 1232–36, 2017.

LIU, Y. *et al.* Investigation on the heat loss characteristic of underground household biogas digester using dynamic simulations and experiments. **Biosystems Engineering**, v. 163, p. 116–133, 2017.

LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A. *et al.* Application of CFD methods to an anaerobic digester: The case of Ontinyent WWTP, Valencia, Spain. **Journal of Water Process Engineering**, v. 7, p. 131–140, 2015.

LUSK, P.; WISELOGEL, A. E. **Methane recovery from animal manures: The current opportunities casebook**. Washington, DC - United States: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25145.pdf>>.

MADIGOU, C. *et al.* Ecological consequences of abrupt temperature changes in anaerobic digesters. **Chemical Engineering Journal**, v. 361, p. 266–277, 2018.

MATHERI, A. N. *et al.* Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. September 2017, p. 1113–1121, 2018.

MEISTER, M. *et al.* Mixing non-Newtonian flows in anaerobic digesters by impellers and pumped recirculation. **Advances in Engineering Software**, v. 115, n. October 2017, p. 194–203, 2018.

MELO, C. A. JANNUZZI, G. D. M.; BAJAY, S. V. Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 222–234, 2016.

MERLIN, G.; KOHLER, F.; BOUVIER, M.; LISSOLO, T.; BOILEAU, H. Importance of Heat Transfer in an Anaerobic Digestion Plant in a Continental Climate Context. **Bioresource Technology**, v. 124, p. 59–67, 2012.

MOHAMMADREZAEI, R.; ZAREEI, S.; KHAZAEI, N. B.-. Optimum mixing rate in biogas reactors: Energy balance calculations and computational fluid dynamics simulation. **Energy**, v. 159, p. 54–60, 2018.

MUÑOZ, R. *et al.* A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 14, n. 4, p. 727–759, 2015.

NGUYEN, D. *et al.* Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 193, p. 513–522, 2015.

NGUYEN, D.; KHANAL, S. K. A little breath of fresh air into an anaerobic system: How microaeration facilitates anaerobic digestion process. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 7, p. 1971–1983, 2018.

OUHAMMOU, B.; AGGOUR, M.; FRIMANE, A. Feasibility study of integrating solar energy into anaerobic digester reactor for improved performances using TRNSYS simulation: Application Kenitra Morocco. **Energy Procedia**, v. 136, p. 402–407, 2017.

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

RAJESHWARI, K. V. *et al.* State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 4, p. 135–156, 2000.

RASOULI, M. *et al.* CFD simulation of fluid flow in a novel prototype radial mixed plug-flow reactor. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 64, p. 124–133, ago. 2018.

RASTEGAR, S. O. *et al.* Optimization of petroleum refinery effluent treatment in a UASB reactor using response surface methodology. **Journal of Hazardous Materials**, v. 197, p. 26–32, 2011.

SAHU, P. *et al.* Automation in Biogas Plant for Enhancement of Efficiency and Safety. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 4, p. 5351–5356, 2017.

SAJJADI, B. *et al.* Fluid dynamic analysis of non-Newtonian flow behavior of municipal sludge simulant in anaerobic digesters using submerged, recirculating jets. **Chemical Engineering Journal**, v. 298, p. 259–270, 2016.

SAKAR, S.; YETILMEZSOY, K.; KOCAK, E. Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment - A literature review. **Waste Management and Research**, v. 27, n. 1, p. 3–18, 2009.

SEN, B. *et al.* State of the art and future concept of food waste fermentation to bioenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 547–557, 2016.

SILVA, S. C. **Programa nacional e potencial brasileiro de produção em sistemas automatizados de biogás**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2017.

SOUZA, C. F.; CAMPOS, J. Avaliação do tempo de retenção hidráulica, agitação e temperatura em biodigestores operando com dejetos de suínos. **Rev. Bras. Agroecologia**, v. 2, n. 1, p. 1–4, 2007.

SOUZA, K. C. G. **Modelo de simulação para análise da viabilidade de geração de energia a partir da utilização de biodigestores**. [s.l.] Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2010.

STAZI, V.; TOMEI, M. C. Enhancing anaerobic treatment of domestic wastewater: State of the art, innovative technologies and future perspectives. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 78–91, 2018.

TAUSEEF, S. M.; ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 704–741, 2013.

TCHOBANOGLIOUS, G. D.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater Engineering - Treatment and Reuse**. 4^a ed. [s.l.] McGraw-Hill Higher Education, 1979.

UTECH, C. *et al.* Avaliação de variações térmicas em biodigestor modelo Bioköhler no período de transição outono – inverno. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 2, p. 208–227, 2017.

WIESE, J.; HAECK, M. Instrumentation, control and automation for full-scale manure-based biogas systems. **Water Science and Technology**, v. 54, n. 9, p. 1–8, nov. 2006.

WU, B. CFD investigation of turbulence models for mechanical agitation of non-Newtonian fluids in anaerobic digesters. **Water Research**, v. 45, n. 5, p. 2082–2094, 2011.

ZHUO, Y. *et al.* Characteristics of Low H₂S Concentration Biogas Desulfurization using a Biotrickling Filter: Performance and Modeling Analysis. **Bioresource Technology**, 2019.

ZIELIŃSKI, M. *et al.* Cavitation-based pretreatment strategies to enhance biogas production in a small-scale agricultural biogas plant. **Energy for Sustainable Development**, v. 49, p. 21–26, 2019.

Capítulo 3: Avaliação de trocas térmicas de biodigestor de fluxo tubular utilizando o *software Energy Plus*

3.1 Introdução

A energia renovável vem se tornando um elemento-chave para estratégia de geração de energia elétrica e na redução de impactos ambientais. A crescente preocupação com as mudanças climáticas, o aumento dos preços e a finitude dos combustíveis fósseis fizeram com que muitos países priorizassem pesquisas de novas tecnologias em fontes alternativas de energia (Almeida et al., 2017).

A digestão anaeróbia (DA) é um processo biológico, realizado por microrganismos (arqueas metanogênicas) na ausência de oxigênio. A DA realiza a conversão eficiente de esterco de animais, resíduos da agricultura, produção agrícola exclusiva para a produção de biogás, resíduos da agroindústria, resíduos sólidos urbanos, águas residuárias inclusive do tratamento de esgoto entre outros em energia renovável limpa (biogás) bem como em fertilizante orgânico (Yu et al., 2008). A eficiência desse processo biológico depende principalmente das características físico, químicas e bioquímicas do substrato que alimenta o biodigestor, como temperatura, pH, tempo de retenção hidráulica (T_{RH}), carga orgânica (D_{QO} – Demanda química de oxigênio e D_{BO} – Demanda bioquímica de oxigênio), tempo de retenção dos sólidos e também a homogeneização como citado na seção 2.6 no Capítulo 2 (Kariyama, Zhai e Wu, 2018).

Dentre os parâmetros citados a temperatura é decisiva tanto na classificação do tipo de digestão quanto na produção de metano (CH_4). A digestão anaeróbia pode ocorrer em diversas condições e com diversos substratos, os microrganismos psicrófilicos possuem maior eficiência em temperaturas entre 15 a 25 °C, os mesófilicos entre 35 a 40 °C, já os termófilicos se desempenham melhor entre temperaturas de 50 a 60 °C. Apesar disso, as arqueas mesófilicas são comumente indicadas, operando entre 35-37 °C, para a produção de CH_4 a partir de resíduos animais (Arıkan, Mulbry e Lansing, 2015).

A partir de dejetos da suinocultura a faixa ótima de temperatura para a produção de metano é entre 30 – 40 °C (Elsgaard, Olsen e Petersen, 2016). A formação de metano na DA é sensível a grandes variações de temperaturas, ou

seja, é desejável que a temperatura operacional do reator tenha um comportamento estável com variações menores do que 0,5 °C por dia. Biodigestores que são alimentados com dejetos em temperaturas próximas à 30 a 40 °C ou estão localizados em ambientes com altas temperaturas externas podem até dispensar sistema de aquecimento auxiliar, mas não terão o funcionamento otimizado. Na ausência de temperaturas externas elevadas e aquecimento auxiliar do substrato a produção de biogás com alta concentração de metano, será definitivamente prejudicada (Merlin et al., 2012). Existem muitos reatores no mundo que não possuem um sistema de aquecimento o que resulta em grandes variações na produção de biogás (Merlin et al., 2012). Até onde se sabe, no Brasil praticamente inexistente o controle da temperatura do substrato de biodigestores de resíduos da suinocultura (Machado, 2017).

Liu e Bao (2017) avaliaram a produção de energia elétrica a partir do biogás produzido por diferentes tipos de biomassa, e confirmaram que quanto maior a concentração de metano no biogás maior a geração de eletricidade. Desta forma a digestão anaeróbia deve ser realizada em condições que favoreçam a maior geração de biogás com maior concentração de metano, para maximizar seu potencial de geração de energia elétrica.

Foram constatadas no ano de 2017, 127 usinas de biogás no Brasil com produção de biogás de cerca de 1,6 milhão de Nm³/dia, o que representa 584 bilhões m³ de biogás por ano. Somadas as usinas de biogás possuem um potencial de geração de energia elétrica de cerca de 3835 GWh por ano (Freitas et al. 2019). Existem muitos reatores no mundo que não possuem um sistema de aquecimento o que resulta em grandes variações na produção de biogás (metano) e assim altas variações na produção de energia elétrica ao longo do ano (Merlin et al. 2012).

O biogás tem vantagens definidas em comparação com outras alternativas de energia renovável: pode ser produzido quando necessário, facilmente armazenado em quantidades razoáveis e distribuído através das redes de gás natural existentes como um substituto do gás natural (Holm-Nielsen, Seadi, Al e Oleskowicz-Popiel, 2009). Além do mais a produção de biogás promove a minimização de impacto ambiental que poderia ser causado pelos resíduos tratados nos biodigestores, o que

em geral não ocorre com a maioria das outras fontes renováveis de energia, como por exemplo a energia solar fotovoltaica.

Nesse cenário a DA desempenha um papel de grande importância, pois é uma biotecnologia com grande potencial e pode ser usada com praticamente todos os tipos de biomassa (Appels et al., 2011).

Os biodigestores são equipamentos abastecidos por biomassa e favorecem a taxa em que ocorre a biodigestão anaeróbia. Existem vários tipos de biodigestores, variando sua forma de construção por exemplo: cilíndricos ou tubulares, bem como a forma de operação, podendo ser alimentados por cargas contínuas ou por bateladas (Calza et al., 2015).

O tipo de biodigestor mais utilizado no Brasil, tendo sua maior parcela devido as granjas de suinoculturas, é o modelo de fluxo tubular com impermeabilização por meio de manta plástica inferior e superior (Figura 3.1). Comumente conhecido como modelo canadense ou, do inglês, *plug-flow* (Barros, 2008).



Figura 3.1 – Vista de um biodigestor real de fluxo tubular com manta plástica (Sinuelo, 2016).

A construção deste reator (Figura 3.1) ocorre por meio da escavação de um reservatório de fermentação no solo, a qual possui forma de trapézio ou tronco de pirâmide invertida, a razão desse formato de estrutura é para se evitar deslizamentos de terra. O revestimento da parte superior é feito por meio de uma manta de polietileno de alta densidade (PEAD) e que possui de 0,8 mm a 2,0 mm

de espessura, podendo ser das cores preta ou branca. Em geral, estas mantas plásticas possuem tratamento químico para a proteção da radiação ultravioleta.

Já o revestimento da parte inferior tem-se como opção a utilização de material sintético flexível. Como exemplo tem-se a manta de policloreto de vinila – PVC (do inglês *Polyvinyl chloride*) e também de PEAD, a qual pode apresentar espessuras de 0,8 mm a 1,0 mm e em geral são da cor preta (Silva, 2016).

Este modelo de biodigestor pode ser caracterizado como de baixo-custo, pois não possui nenhum tipo de dispositivo ativo tanto de aquecimento quanto de agitação. O aquecimento é proveniente majoritariamente da radiação solar de forma passiva. As temperaturas necessárias para que ocorra a biodigestão, por exemplo as das condições mesofílicas, só ocorrem eventualmente, o que colabora para diminuir a eficiência deste modelo de biodigestor (Martí-Herrero, Alvarez e Flores, 2018).

Após um período de tempo ocorre a degradação necessária da matéria orgânica, então o substrato biodigerido, chamado de digestato pode retornar a natureza nas formas de biogás e biofertilizante. No Brasil o tempo de Retenção Hidráulica (T_{RH}) médio no tratamento de efluentes em suinoculturas varia de 22 a 30 dias (Barros, 2011). No entanto, o T_{RH} para que haja a biodigestão completa depende das condições de operação, especialmente do regime de temperatura e da agitação, mas também de outros parâmetros como pH, presença de antibióticos e hormônios nos resíduos.

Analisar as trocas térmicas com o solo é muito importante, por se tratar de um modelo semienterrado, uma vez que 100% do substrato, ou seja, as *arqueas* estão separadas do solo, apenas pela manta plástica em muitos dos casos. Assim é necessário conhecer os mecanismos de transporte de calor entre o substrato e o solo.

O solo é um material heterogêneo tornando complexa a modelagem de todas as taxas de transferências de calor envolvendo-o. Além da dependência dessas trocas térmicas com as variações das propriedades deste material. Sendo assim é de grande importância a classificação e caracterização do solo o mais próximo à realidade, modelando-o melhor possível. A transferência de calor por condução no solo é uma das formas de transporte de calor mais relevante. Porém há também a

transferência de calor por convecção, que ocorre por meio das lacunas de ar ou vapor d'água presente na matriz do solo, e radiação, que ocorre entre as lacunas vazias dentro da matriz do solo. Trocas térmicas por radiação são significativas em solos secos e com altas temperaturas (Clements, 2004; Incropera e Dewitt, 1996; Sterling *et al.*, 1993).

Segundo os mapa de solos do estado de Minas Gerais (2010), os solos de Viçosa são classificados como “*Latossolo vermelho-amarelo distrófico petroplíntico a moderado argiloso álico mata de galeria relevo suave-ondulado a ondulado*” com o símbolo de LVAd29.

O solo também deve ser classificado também quanto ao seu teor de umidade como seco ou saturado. Se considera um solo como saturado quando todas as lacunas vazias são preenchidas por água, já no caso do solo seco todas as lacunas são preenchidas por ar. Na natureza encontra-se mais facilmente uma mistura de ambos, ou seja, solos que tenham água e ar (Morselli, 2009).

O uso do ferramental da simulação computacional do comportamento térmico e hidrodinâmico de biodigestores vem ganhando cada mais espaço entre os pesquisadores da área. Além da facilidade e menor custo de implementação, a simulação computacional permite a simulação de um número muito grande situações, diminuindo a necessidade de experimentos, além do mais tem obtido resultados próximos aos da prática. Liu *et al.* (2017) realizaram uma simulação por meio de *software* das trocas térmicas de um biodigestor subterrâneo doméstico na China. Os autores compararam os resultados de simulação com experimentais e obtiveram um erro máximo do fluxo de calor médio de 5,9 %.

Hreiz *et al.* (2017) simularam um biodigestor agrícola semienterrado na França, aprimorando a modelagem ao inserir termos inéditos de transferência de calor, como as perdas de calor por radiação na superfície do biodigestor que em trabalhos anteriores eram negligenciados. Os resultados numéricos obtidos foram condizentes aos dados experimentais disponíveis.

Resende (2017) estudou modelos de transferência de calor no *software Energy Plus: GroundDomain e DetailedGroundHeatTransfer*. O primeiro modelo, *GroundDomain*, possui três métodos numéricos de solução: *FiniteDifference*, *KusudaAchenbach* e *Xing*. Já o segundo modelo, *DetailedGroundHeatTransfer*,

possui somente uma forma de solução numérica, além do mais é considerado ser mais sofisticado tendo maior detalhamento na descrição da construção e de opções de materiais. Por meio de simulações a autora indicou vantagens e desvantagens da modelagem dos dois métodos, indicando os para aplicações em ambientes subterrâneos.

Hassanein *et al.* (2015) utilizaram o *software Energy Plus* para simular o aquecimento passivo de um biodigestor no noroeste da China e compararam-no com outro reator sem aquecimento. O sistema de aquecimento se mostrou viável em regiões onde as temperaturas sejam superiores à -5 °C. O estudo obteve bons resultados, apresentando 0,34 °C de diferença entre valores experimentais e simulados.

Dentro deste contexto, a análise das trocas térmicas de biodigestores é de grande importância (Penteado et al., 2018), pois visa alcançar maiores eficiências na degradação da matéria orgânica, maior geração de biogás e valorizar o efluente tratado (biofertilizante) como fonte de nutrientes para a atividade agrícola. Assim a escolha de materiais, bem como a determinação do *design* do biodigestor são diretamente influenciadas pelo resultado da avaliação das trocas térmicas nos biodigestores.

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo geral

Analisar as trocas térmicas do biodigestor de fluxo tubular com manta plástica por meio de simulação no *software Energy Plus*.

3.2.2 Objetivos específicos

- iv. Modelar um sistema com um biodigestor modelo tubular e as condições de contorno envolvidas;
- v. Localizar e caracterizar as principais perdas de calor e o comportamento das temperaturas internas do biodigestor e suas relações com a temperatura do ar ambiente e do solo; e

- vi. Realizar a validação dos dados de simulação com dados experimentais de biodigestor de uma suinocultura.

3.3 Material e Métodos

Nesta seção são descritos os procedimentos e ferramentas utilizadas para desenvolver a simulação. Detalhando a modelagem do biodigestor, o algoritmo dos *softwares* e a caracterização para efeito de transferência de calor do substrato.

O biodigestor escolhido para a simulação foi o modelo de fluxo tubular com manta plástica, devido a sua popularidade no Brasil, especialmente nas suinoculturas.

3.3.1 Modelagem do biodigestor e das condições de contorno

O primeiro passo para a modelagem foi determinar as dimensões do biodigestor a ser estudado. Como as dimensões dos biodigestores estão relacionadas com a quantidade de substrato que deverá ser digerida, tempo de retenção hidráulica, regime de temperaturas envolvidos e o *design* adotado pode-se encontrar diversas possibilidades que satisfaziam estas condições. Para o estudo, optou-se por adotar as dimensões de um biodigestor de resíduos de suinocultura, tipo tubular em operação, localizado em Teixeira, Zona da Mata de Minas Gerais.

A propriedade possui dois biodigestores com a capacidade para receber dejetos de uma granja de ciclo completo de 1000 matrizes, correspondendo cerca de 11.000 animais em diferentes fases de crescimento de leitões recém-nascidos até animais para o abate com cerca de 110 kg.

Como não foram encontrados arquivos de dados climáticos para Teixeira-MG, optou se por realizar a simulações utilizando os dados climáticos e de solo de Viçosa, Minas Gerais, devido à proximidade de apenas 13 km entre as cidades

O biodigestor simulado possui as seguintes dimensões: 12 m de largura, 30 m de comprimento e 5 m de profundidade (abaixo do nível do solo), sendo que apenas 4,5 m são preenchidos pela mistura de dejetos e água, formando o substrato. E

possuem ainda uma altura de 4 m (acima do nível do solo) para o armazenamento de biogás.

As simulações foram feitas no *software Energy Plus* (EPlus), Versão 8.7, cuja geometria foi modelada por meio do *plugin Legacy Open Studio*. Foi construído um modelo do biodigestor no *software Google SketchUp*, que pode ser visto na Figura 3.2. Com esse conjunto de programas foi possível simular as trocas térmicas do reator com o meio externo, incluindo as transferências de calor do substrato para o solo e para o ar ambiente.

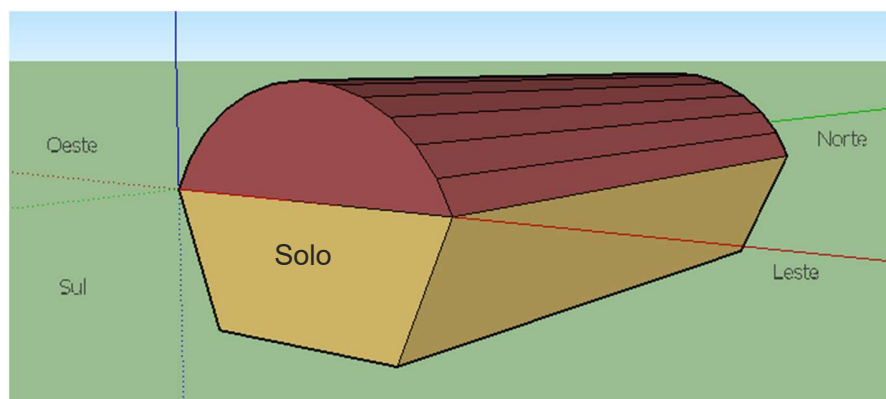


Figura 3.2 - Maquete do biodigestor elaborado no *software Google SketchUp*.

Para se modelar o substrato contido no biodigestor foi necessário incluir uma massa interna na simulação, o programa EPlus utilizado já possuía esta ferramenta, denominada *Internal Mass* (massa interna). Ao inserir essa massa interna deve-se selecionar a espessura e a área de ocupação. O volume total que o substrato ocupa é de 1323 m³.

O software utilizado possui limitações quanto a máxima espessura de camadas de materiais que podem ser modeladas, i. e. 0,8 m. Portanto, foi considerada uma massa interna cujo volume fosse igual à quantidade de substrato, mas de dimensões (espessura, comprimento e largura) diferentes daquelas passíveis de se colocar no biodigestor. Ele considera o interior do biodigestor como um espaço térmico homogêneo, o que leva os efeitos do substrato no interior ser independente da geometria da massa interna inserida. Assim, desde que o volume seja mantido conforme o original, as condicionantes termodinâmicas são atendidas.

O próximo passo para a modelagem do biodigestor foi detalhar no *software* EPlus as propriedades térmicas de cada um dos materiais que compõem o reator. Foi simulado nesta pesquisa um biodigestor em operação que possui o revestimento superior e inferior de mantas de PEAD. A espessura da manta superior é de 1,25 mm, já a manta inferior é 1,0 mm. Outras propriedades utilizadas estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades térmicas do polietileno de alta densidade (PEAD). (Adaptado de Souza, Rossini e Schaeffer, 2013).

Propriedades Térmicas	Valor	Normas
Calor específico a 23 °C	1700,0 J/K kg	—
Condutividade térmica a 23 °C	0,35 W/K m	DIN 52612
Massa específica	950,0 kg/m ³	ASTMD792
Temperatura mínima e máxima	-40 a 90 °C	—

Foi considerado o T_{RH} de 30 dias conforme a descrição de (Souza e Campos, 2007) para biodigestores de resíduos da suinocultura. Sendo assim as simulações foram feitas para esse tempo.

Foram realizadas simulações de trocas térmicas para dois intervalos de 30 dias durante o inverno (do dia 08 de junho até o dia 06 de julho de 2017) e o verão (do dia 07 de dezembro de 2017 até o dia 05 de janeiro de 2018), caracterizando assim um biodigestor operando em batelada. Estes períodos de 30 dias são formados por 15 dias anteriores e 14 dias posteriores ao solstício de inverno e verão do Hemisfério Sul (HS), respectivamente.

No solstício de inverno é quando se tem a menor incidência de raios solares no HS, ao contrário do solstício de verão quando se a maior incidência de raios solares no HS (Silva, 2006). Desta forma, as simulações sendo realizadas nestes períodos, pode-se sugerir que os resultados alcançados sejam para as alturas solares mais extremas, ou seja, para o período em que o sol está mais baixo e mais alto na abóbada celeste, para o período de inverno e verão, respectivamente, o que se reflete nas temperaturas do ar.

As simulações fizeram uso das propriedades térmicas da água para estimar o comportamento do substrato tendo em vista que o substrato pode ser 80 % água,

a saber: condutividade térmica: 0,58 W/m K e calor específico: 4186,8 J/K kg, análogo aos estudos de Hreiz *et al.* (2017); Liu *et al.* (2017); Curry e Pillay (2015). A massa específica do substrato foi considerada igual à referenciada ao lodo de esgoto (1020,0 kg/m³) (Almeida, 2015).

Para simular as trocas térmicas existentes entre o solo e o biodigestor, foi necessário ter conhecimento das propriedades termofísicas do material e da sua classificação: massa específica do solo, calor específico (c_p) e condutividade térmica do solo (k), 2000 kg/m³, 1550 J/K kg e 1,58 W/m K, para solo caracterizado como argiloso e saturado, como foi o tipo considerado neste estudo.

Segundo Resende (2017) o solo saturado apresenta propriedades térmicas mais acentuadas, ou seja, solos saturados possuem, c_p e k , cerca de 1,80 e 6,83 vezes maiores do que os solos secos, respectivamente. Sendo assim, ao simular o tipo de solo no *EP*, considerou o solo argiloso e saturado no entorno do biodigestor. Esta condição foi considerada crítica para fins de simulação da transferência de calor. O solo foi considerado como argiloso conforme os Mapas de Solo de Minas Gerais (2010) para o município de Viçosa MG.

Por fim escolheu-se os modelos para a análise das trocas térmicas do substrato com o solo. Optou-se por utilizar o método numérico de *Xing*, que pertence ao modelo do objeto *GroundDomain*, como indicado na metodologia de Resende (2017). O perfil da temperatura do solo tanto em contato com manta inferior inclinada quanto horizontal foram calculados segundo metodologia de Kusuda e Achenbach (1965). A correlação do cálculo das trocas térmicas entre essas superfícies requer dados anuais da temperatura da superfície do solo, que foram fornecidos pelos dados climáticos da estação meteorológica de Viçosa (INMET).

3.3.2 Balanço de energia e mapeamento de temperaturas

Para a avaliação das trocas térmicas do biodigestor analisou se o fluxo de calor, calculados por meio de simulação, entre o solo e a manta plástica inferior (q_2 e q_3) e entre a manta plástica superior e o ar ambiente (q_1), como representado na Figura 3.3.

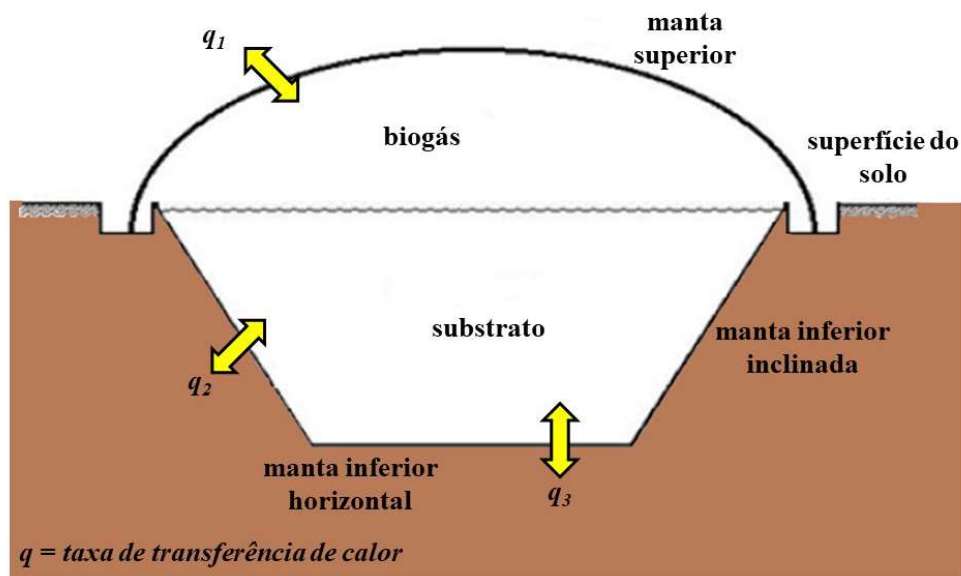


Figura 3.3 - Representação das trocas térmicas das mantas do biodigestor.

Foram simuladas as taxas de transferências de calor por radiação solar, radiação infravermelha, condução e convecção, entre: o biodigestor (substrato e biogás), o solo e o ambiente externo.

A transferência de calor entre a manta plástica inferior e o solo foram calculadas considerando as condições de fronteiras do domínio do solo, *GroundDomain*. No cálculo desse fluxo de calor são consideradas a radiação de ondas longas e curtas, a condução e a convecção. O EPlus também considera a evapotranspiração, que foi calculada como a perda de umidade do solo como foi feito na metodologia de Allen *et al.*, (2005). Para o cálculo das temperaturas do solo adjacente ao biodigestor utilizou o método de diferenças finitas.

Foram consideradas toda a radiação solar incidente na manta superior do biodigestor, o que incluiu tanto a radiação direta, a radiação difusa e por fim, a radiação devido ao albedo da superfície terrestre, essa é a fração da radiação solar refletida após ser difusa no solo. No *software* EPlus o cálculo da radiação solar total incidente é realizado por meio da soma de:

- a. Radiação solar de raios incidentes (W/m^2);
- b. Radiação solar difusa do céu incidente (W/m^2); e

c. Radiação solar difusa no solo (W/m^2).

A taxa de transferência de radiação solar, Q_{at} , no período do T_{RH} , 30 dias, para a manta superior em kW, foi calculada pela multiplicação do somatório de q_i , radiação solar total incidente horária, no período, pela área da superfície da manta superior, $526,65 m^2$. Segundo Hreiz, Adouani, Jannot e Pons, Marie Noelle (2017), para obter o $Q_{atmédio}$, deve se dividir o valor total de Q_{at} , pelo número de dias de simulação, 30 dias, e pelo número de horas de insolação.

As trocas térmicas entre o substrato e o biogás não foram analisadas no modelo estudado, pois segundo Hreiz, Adouani, Jannot e Pons, Marie Noëlle (2017) a baixa emissividade térmica dos gases e por serem quase transparentes aos raios infravermelhos implica em baixas transferências de calor radioativo que podem ser negligenciadas.

A transferência de calor por condução foi modelada no *software* EPlus por séries temporais básicas como em NREL, DOE e BTO (2018). A equação do fator de resposta utilizada relacionou o fluxo em uma superfície de um elemento, a uma série infinita para descrever o comportamento da temperatura dessa superfície em ambos os lados. Assim, a taxa de transferência de calor por condução simulada foi função da temperatura do interior e exterior do elemento e do passo de tempo da simulação.

Para o cálculo de transferência de calor por radiação infravermelha, radiação de ondas longas, utilizou-se um modelo como em NREL, DOE e BTO (2018). Desta forma para o cálculo dessa taxa de transferência analisou-se a temperatura do ar, que varia espacialmente dentro do domínio de simulação, e as diferentes temperaturas do ar presentes nas superfícies que realizam a troca radiação infravermelha com as outras superfícies neste mesmo domínio.

Por fim a taxa de transferência de calor por convecção de uma superfície foi modelada de forma padrão no EPlus, utilizando como dados de entrada o coeficiente de convecção da superfície ($W/m^2 K$); a área da superfície (m^2); a temperatura da superfície (K); e a temperatura do ar ambiente (K).

Foi feita uma pesquisa substancial na formulação de modelos para estimar o coeficiente de convecção a ser empregado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** O EPlus, oferece uma ampla seleção de diferentes métodos para

determinar valores para h_c . As opções básicas disponíveis para a versão utilizada do *software* são:

- a) *SimpleCombined*;
- b) *TARP*;
- c) *MoWiTT*;
- d) *DOE-2*;
- e) *AdaptiveConvectionAlgorithm*; e
- f) Algoritmo do *TARP*.

O método adotado foi o *TARP*, Programa de Pesquisa em Análise Térmica, por ser o método padrão do *software*, que abrange valores de área e perímetro da superfície a ser modelada. O *TARP* tem como variáveis de entrada coeficiente de transferência de calor convectivo forçado, coeficiente de transferência de calor convectivo natural, perímetro da superfície, multiplicador de rugosidade superficial, temperatura do ar ambiente local calculada na altura acima do solo do centroide da superfície, temperatura da superfície, velocidade do vento local calculada na altura acima do solo do centroide de superfície, modificador de direção do vento, ângulo entre o solo exterior da superfície e a normal da superfície externa. O modelo de convecção escolhido é dividido em componentes forçados e naturais, o coeficiente de convecção total é a soma dessas duas componentes (Walton, 1981).

3.3.3 Material isolante

Foi inserida camada de um material isolante entre as mantas inferiores inclinadas e na horizontal a fim de avaliar o novo comportamento dos fluxos de calor. Para proteger o material isolante da umidade e substâncias do solo foi colocada uma segunda manta plástica inferior entre o solo e o isolante. As características utilizadas do material isolante estão apresentadas na Tabela 3.2, que foram utilizadas como dados de entrada para a simulação.

Tabela 3.2 - Propriedades da lã de vidro.

	Lã de vidro de 5,0 cm	Lã de vidro de 7,5 cm
Massa específica (kg/m ³)	35,0	12,0
Condutividade (W/K m)	0,000124	0,000164
Calor específico (J/K kg)	669,89	669,89

Primeiramente foi simulado um caso com apenas uma camada e 5,0 cm do isolante. No segundo caso utilizou-se 2 camadas do material de 5,0 cm e por fim duas camadas do material de 7,5 cm. Desta forma foram implementadas três camadas de material isolante com espessuras de 5,0 cm, 10,0 cm e 15,0 cm.

3.3.4 Validação da simulação

Para validação da simulação realizou uma análise estatística comparando os dados simulados com dados experimentais coletados por (Santos e Reis, 2018) na suinocultura. Os dados experimentais disponíveis eram coletados, a cada 1,0 s, do dia 23 de setembro até dia 08 de dezembro de 2017, e também do dia 10 de janeiro até 29 de março, porém haviam alguns dias e horas sem medições. Desta forma escolheu o intervalo de dados próximo ao período de verão simulado (07 de dezembro e 05 de janeiro), e com menos dias faltantes para a realização da validação dos dados. Então, foram comparados os dados simulados a cada 1,0 s para este modelo do dia 10 a 31 de janeiro de 2018 com os dados experimentais, lembrando que foi necessária a mineração dos dados, para a retirada de dias e horas faltantes na base de dados.

Avaliou-se o erro relativo percentual e absoluto mínimo, máximo e médio, e também o desvio padrão amostral de uma parte dos dados coletados. Os valores validados foram as temperaturas do substrato, do solo, do ar ambiente e do interior do biodigestor (zona térmica) que representa a temperatura média do biogás e do substrato.

3.4 Resultados e Discussão

3.4.1 Balanço de energia e mapeamento de temperaturas

Foram realizadas simulações para o período de 30 dias durante o inverno e o verão, assim foram analisados casos semelhantes para ambas as estações. Optou-se por discutir variações horárias apenas do período simulado no inverno, pois a intenção de tal resultado foi apenas analisar a variação das temperaturas com o fotoperíodo.

A Figura 3.4 apresenta a variação horária de temperatura do ar ambiente (temperatura de bulbo seco do ar livre), e também a previsão da variação horária da temperatura interna do biodigestor, do substrato e da manta inferior horizontal, durante os 30 dias de simulação para o período de inverno.

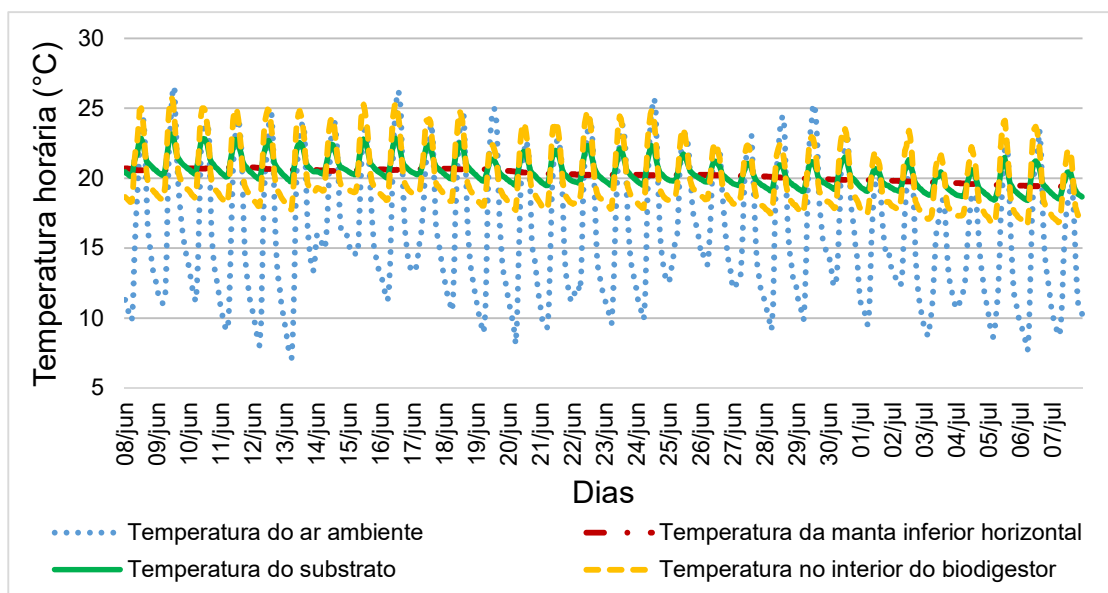


Figura 3.4 – Temperatura horária de bulbo seco no meio externo e comportamento simulado no *software Energy Plus* da temperatura média horária da interface da manta plástica inferior horizontal com o solo e da temperatura média horária no interior do biodigestor, no período de inverno.

Pode-se visualizar também na Figura 3.4, a variação da temperatura média horária na interface da manta plástica inferior horizontal com o solo, T_{imh} . Nota-se que a T_{imh} se manteve praticamente constante em 20 °C por cerca de 21 dias a partir

de 08/jun. Já as temperaturas do interior do biodigestor e do substrato variam com a temperatura do ar ambiente, porém, com menores amplitudes.

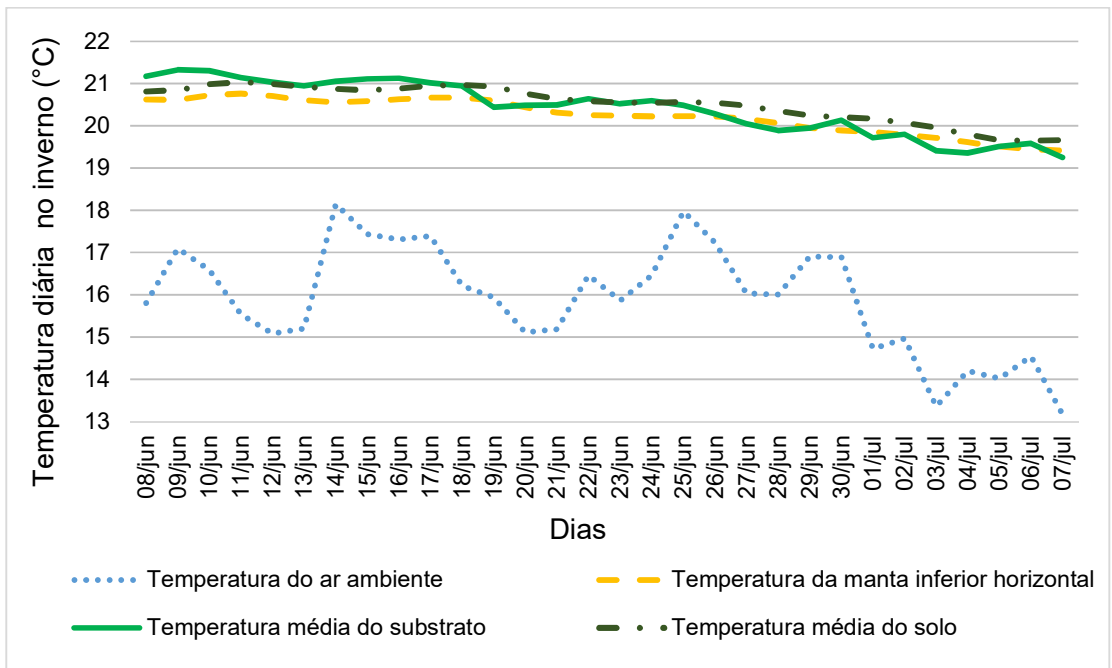
Na Figura 3.5 pode-se observar a variação diária da temperatura do ar ambiente e do solo e a previsão da variação diária das temperaturas do substrato e da manta inferior horizontal para o período de simulação de 30 dias no verão (a) e no inverno (b).

Apesar da temperatura ambiente mínima horária para o período, 7 °C, ter ocorrido em 13 de junho (Figura 3.4), a temperatura média diária do ar ambiente diminui de cerca de 17,1 °C em 09/junho para 14,7 °C em 01/julho, ou seja, as temperaturas médias diárias mudam em geral gradualmente (Figura 3.5 a). Assim, somente a partir de 01 de julho que a temperatura média diária do substrato se manteve abaixo de 20 °C. Pode-se verificar o tempo de resposta às variações da temperatura ambiente na temperatura do substrato no período de simulação do inverno, por exemplo: a queda de 2,4 °C (17,1 para 14,7 °C) na temperatura do meio ambiente implicou na variação de pouco mais do que 1,5 °C na temperatura do substrato após 23 dias.

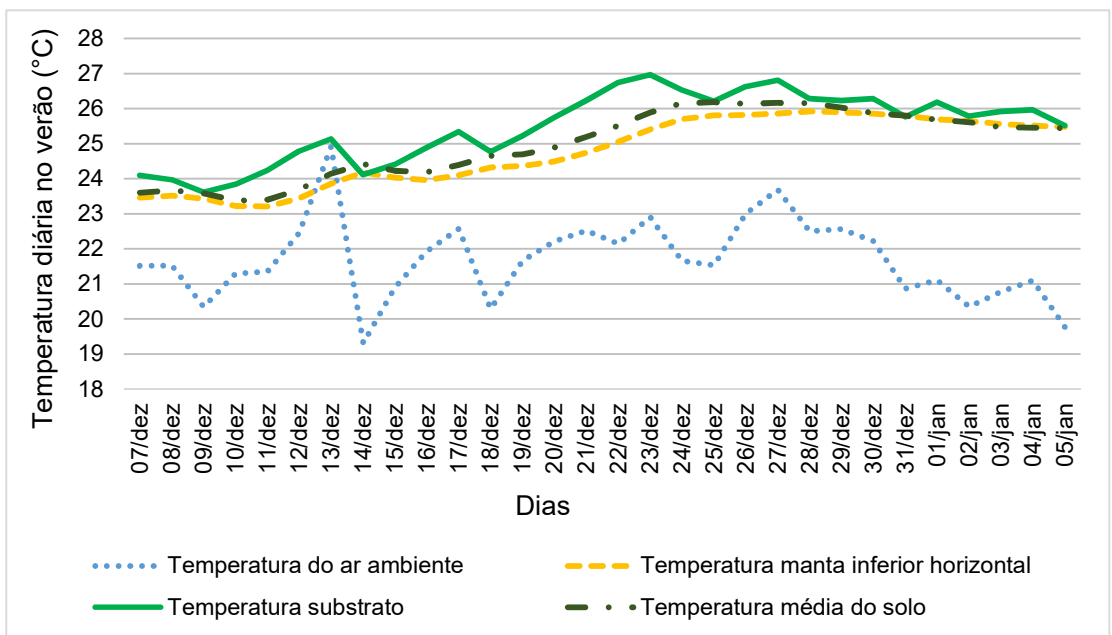
Outra análise importante é que até o dia 18 de junho (Figura 3.5 a) temperatura média do solo é menor ou igual à temperatura média do substrato, a partir deste dia a temperatura média do solo foi maior, o que implica na possível inversão na taxa de transferência de calor entre o solo e o biodigestor, como será apresentado mais adiante.

Já para o período simulado no verão (Figura 3.5 b) a temperatura média diária do ar ambiente teve sua máxima no dia 13 de dezembro, 25 °C, porém, a temperatura máxima do substrato ocorreu apenas no dia 23 de dezembro, o que implica uma inércia térmica do substrato. A temperatura do ar ambiente aumentou de cerca de 20,35 °C em 09/dez para 25,13 °C em 13/dez.

O aumento mais acentuado para a temperatura do substrato ocorreu do dia 18/dez, 24,65 °C até o dia 23/dez, 26,97 °C, pode-se então associar esses dois aumentos de maior amplitude da temperatura do ar ambiente e do substrato do biodigestor, tendo como resposta do dia 09/dez até o dia 18/dez um tempo de 09 dias.



(a) Inverno



(b) Verão

Figura 3.5 – Temperatura média diária do ar ambiente, do solo e comportamento simulado no *software Energy Plus* da temperatura média diária da interface da manta plástica inferior horizontal com o solo e da temperatura média horária no interior do biodigestor nos períodos de: (a) Inverno e (b) Verão.

Pode-se verificar também que a temperatura média diária do ar ambiente inicia uma queda constante no dia 27/dez, 23,7 °C, e chega aos 19,7 °C no dia 04/jan. Já a temperatura média do substrato diminui apenas 1,35 °C (26,8 para 25,45 °C) nesse mesmo período. Explicitando assim o tempo de resposta às variações da temperatura ambiente na temperatura do substrato para este período de simulação.

Além da relação com a variação da temperatura do ar ambiente, pode-se observar pela Figura 3.5, que a temperatura do substrato também é afetada pela a variação da temperatura do solo é menor e possui menores picos que a temperatura do substrato. A variação média da temperatura do solo é muito similar à temperatura da manta inferior horizontal do biodigestor, pois além de estar em contato direto com o solo, é a parte que se encontra mais distante do ar ambiente. Desta forma, enquanto o solo é responsável pela manutenção geral da temperatura do biodigestor, a temperatura ambiente gera as variações temporárias na curva, principalmente quando as primeiras estão mais altas

O comportamento das temperaturas horárias do substrato varia com a temperatura do ar ambiente, porém, pode-se perceber que sua variação diária está cerca de 4,53 e 3,77 °C acima da temperatura ambiente, para o período simulado no inverno e verão, respectivamente. Assim, observa-se que a temperatura do substrato está mais próxima da temperatura do solo, confirmando a relação da temperatura do substrato para com a temperatura solo.

Sendo assim, a Figura 3.5 apresenta o tempo de resposta às variações da temperatura ambiente na temperatura do substrato, e também a influência da temperatura do solo na temperatura do substrato, principalmente no período simulado no verão. Este comportamento pode ser devido à influência dos seguintes fatores: (i) a grande capacidade térmica do biodigestor e do solo circundante; (ii) o fato do biodigestor em questão não ser isolado termicamente; e (iii) ter como fonte de aquecimento primário a radiação solar e secundário o solo.

Estes resultados confirmam que as trocas de calor, (q_1 , q_2 e q_3) variam lentamente com o tempo. Sendo assim perturbações causadas por condições climáticas que variam rapidamente, em questões de horas, podem ser negligenciadas, na maioria das vezes. Outro ponto importante é que as perdas para o solo (q_2 e q_3) dependem principalmente das condições climáticas que prevalecem no local. Hreiz, Adouani, Jannot e Pons, Marie Noelle (2017) em seus estudos de

simulação comprovaram tais resultados para diferente modelo de biodigestor e em outras condições climáticas, i. e Nancy, França.

A Tabela 3.3, apresenta a variância da temperatura média diária do ar ambiente, do solo e o comportamento simulado no *software Energy Plus* das temperaturas médias diárias da: (i) manta plástica inferior horizontal com o solo; (ii) manta plástica inferior inclinada com o solo; (iii) manta plástica superior e (vi) no interior do biodigestor (substrato e o biogás). Estes resultados foram simulados para o período de no inverno e no verão.

Tabela 3.3 - Variância da temperatura média diária do ar ambiente, do solo de dados da estação meteorológica e do biodigestor e de suas partes simulado no *software Energy Plus* para o período de inverno e de verão.

	Temperatura média (°C)		Variância	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão
Ar ambiente	15,89	21,70	1,70	1,38
Manta inferior inclinada	20,79	25,20	0,21	0,97
Manta inferior horizontal	20,23	24,78	0,17	0,95
Manta superior	19,04	26,59	1,54	5,45
Substrato	20,42	25,47	0,41	0,98
Biodigestor	20,01	25,50	0,48	1,22
Solo	20,51	24,99	0,19	0,94

A Tabela 3.3 mostra que as temperaturas no período do verão tendem a variar mais, pois mesmo com a variância da temperatura média do ar ambiente sendo maior durante o período simulado no inverno, as oscilações de temperatura no período do verão foram mais acentuadas, por exemplo ocorreu a queda de temperatura de 25,14 °C no dia 13/dez para 19,32 °C no dia 14/dez.

Também é possível observar que o valor da variância da temperatura do substrato está entre o valor da variância da temperatura do ar ambiente e do solo, como dito anteriormente, ambas as variações de temperatura influenciam na variação da temperatura do substrato, porém, esta possui seu próprio tempo de resposta. Ressalta-se que as variáveis que sofreram as maiores variâncias foram as temperaturas do ar ambiente e da manta superior, provavelmente devido as suas baixas inércias térmicas.

3.4.2 Material isolante

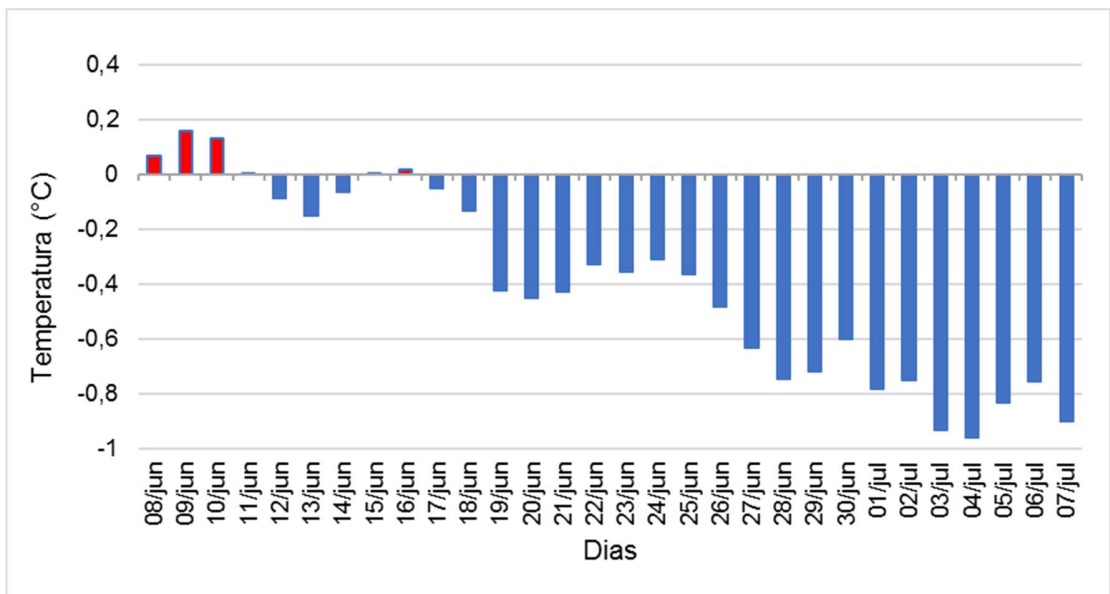
A próxima análise foi realizada após a inserção da camada do material isolante entre as duas mantas inferiores, horizontal e inclinadas. Não foi observada uma grande diferença tanto das trocas térmicas quanto da temperatura, com a inserção de diferentes espessuras de camadas de isolante, com diferença de 0,002 °C na temperatura. Assim, tanto para camadas com espessuras de 5,0 cm, 10,0 cm e 15,0 cm os resultados obtidos foram semelhantes, os resultados apresentados são para a camada de isolante com espessura de 5,0 cm, pois seria o de menor custo.

A Figura 3.6 apresenta a diferença das temperaturas médias do substrato no interior do biodigestor com e sem o material isolante para o período simulado no (a) inverno e (b) verão. Na Figura 3.6 (a), pode-se observar que com a inserção da camada do material isolante a temperatura do substrato na maior parte do período de simulação diminuiu em cerca de 0,5 °C, não atingindo a diferença de 1,0 °C durante o período simulado. Apenas no início do período de simulação, 06 dias, houve um aumento abaixo que 0,2 °C na temperatura do substrato no interior do biodigestor.

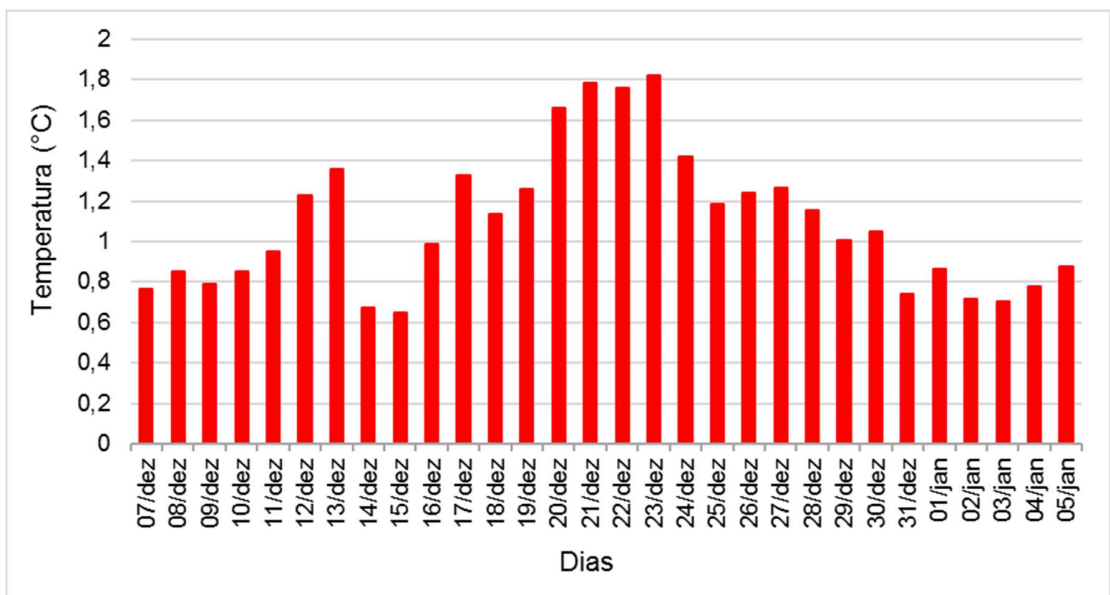
Como as temperaturas médias do substrato se reduziram com a adição do material isolante, na maior parte do período de simulação, pode-se perceber que a taxa de calor recebido pelo substrato é maior do que o cedido ao solo. Desta forma o solo durante o período de inverno, contribui para manter a temperatura do substrato em valores mais elevados.

Já pela Figura 3.6 (b), pode-se observar que a diferença entre as temperaturas médias do substrato com e sem o material isolante foram positivas durante todo o período de simulação no verão. Além disso, pela simulação pode-se observar que a presença do material isolante contribui com um aumento médio de 1,10 °C e máximo de 1,82 °C na temperatura média do substrato.

Na Figura 3.6 (b) também pode-se observar que o biodigestor possui perdas para o domínio do solo no período de verão, ao contrário do período de inverno que possui ganhos maiores que perdas diárias.



(a) Inverno

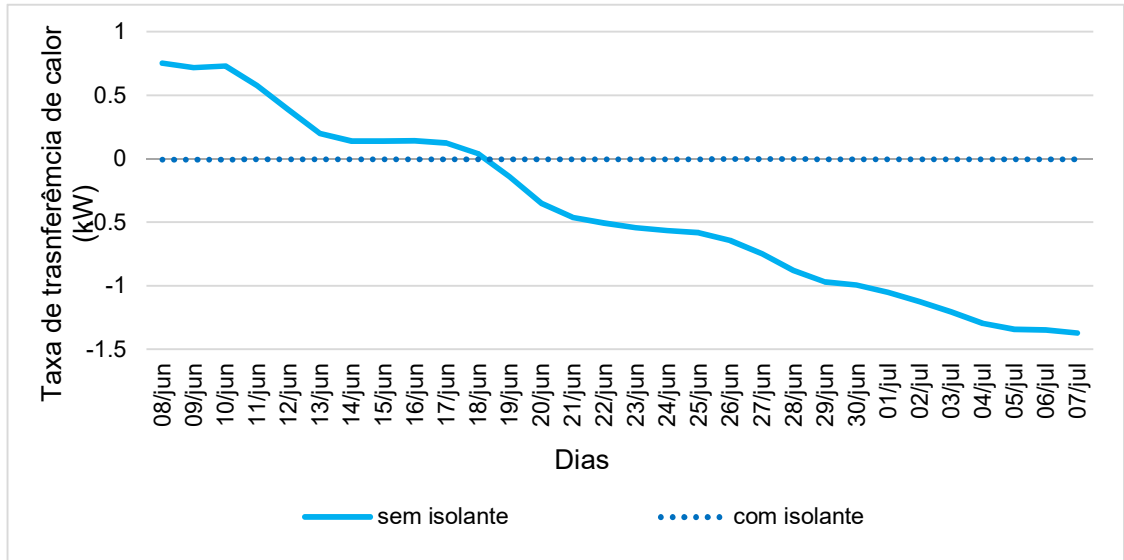


(b) Verão

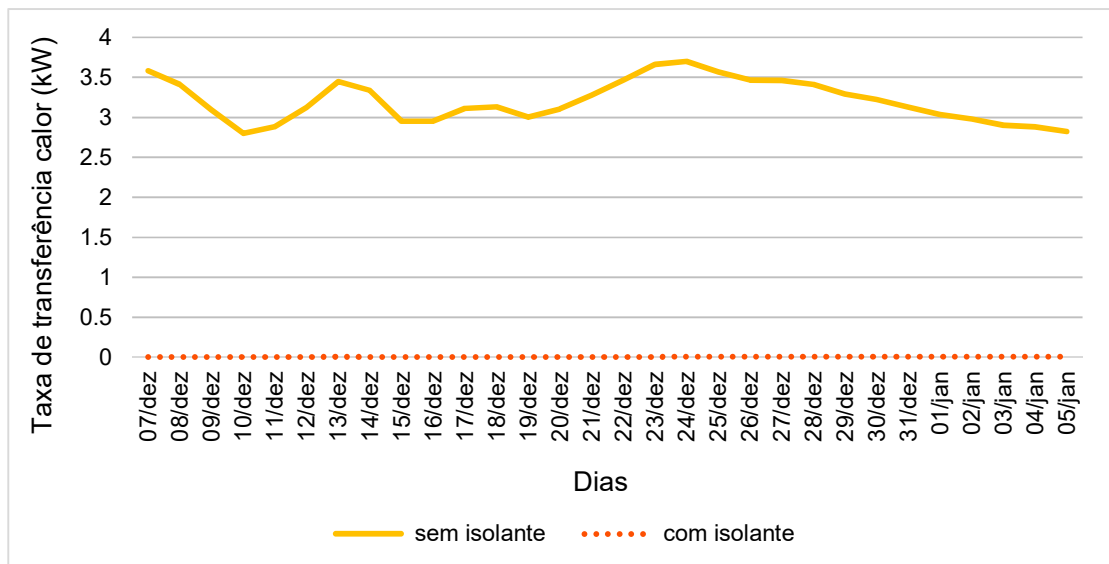
Figura 3.6 - Diferença da temperatura do substrato com e sem a camada do material isolante para os períodos de: (a) Inverno e (b) Verão.

A Figura 3.7 mostra a taxa de transferência de calor total no domínio do solo modelado no *software Energy Plus*, com e sem a camada de material isolante para o período de (a) inverno e (b) verão. Quando a taxa de calor é positiva significa que

o solo está recebendo calor da manta inferior (q_2 q_3), tanto da manta inferior inclinada quanto da horizontal, já quando a taxa de calor é negativa, significa que o solo está perdendo calor para manta inferior do biodigestor.



(a) Inverno



(b) Verão

Figura 3.7 – Taxa de transferência de calor da manta inferior do biodigestor para o solo, no sentido positivo (biodigestor para o solo) e negativo (solo para o biodigestor) nos períodos de: (a) Inverno e (b) Verão.

Na Figura 3.7 (a) pode-se perceber que a partir do dia 18/jun. o biodigestor deixa de perder calor para o solo e começa a receber. Se houvesse camada isolante o biodigestor teria menos perdas térmicas, porém, também não receberia transferência de calor a partir do solo, que neste caso, seria maior do que as perdas. A taxa média de transferência de calor perdida para o solo seria de cerca de 0,13 kW com duração de 11 dias, já a recebida seria de 0,54 kW com duração de 19 dias, para o período estudado.

Por outro lado, por meio da Figura 3.7 (b) percebe-se que o domínio do solo recebe calor do biodigestor em todo o período de verão. Ou seja, a manta inferior do biodigestor (que está em contato com o solo) perdeu calor para o solo, a uma taxa média de transferência de 3,21 kW. Desta forma ao se inserir a camada de material isolante as perdas para o solo se aproximam de zero, o que torna o biodigestor mais eficiente, aumentando em aproximadamente 2,0 °C a temperatura do substrato como foi visto na Figura 3.6 (b).

Ao se inserir o material isolante as taxas de transferência de calor entre a manta inferior e o solo em ambos os períodos de simulação se aproximam de zero (Figura 3.7). Para o período de inverno o isolante impede que o biodigestor receba parte do calor, reduzindo a temperatura do substrato. Porém no período do verão o isolante elimina as perdas constantes do biodigestor para o solo elevando assim a temperatura do substrato. As perdas eliminadas com a presença da camada isolante no período do verão são maiores que os ganhos no inverno. Porém pode-se observar que a temperatura média diária do substrato tanto no período do inverno quanto no verão, 20,4 e 25,5 °C, mantiveram-se acima da temperatura do meio ambiente, que foram de 15,9 e 21,7°C, respectivamente.

Assim, apesar de haver biodigestão, não se pode dizer que a produção de biogás foi otimizada, pois as arqueias não conseguem metabolizar de forma maximizada visto que não se alcançou a faixa de temperaturas ideal que é entre 35 e 37°C, mesmo no período do verão com a presença da camada isolante, conforme (Sakar, Yetilmezsoy e Kocak, 2009). Este resultado de simulação confirma a necessidade de haver aquecimento e de agitação, pois não se tem garantia de uniformização da temperatura do substrato, para que a produção possa ser otimizada (Nguyen *et al.*, 2015). A necessidade da agitação também pode ser

justificada para melhorar o contato entre os microrganismos e a matéria sólida a ser digerida, aumentando a produção de biogás (Latha *et al.*, 2019). A agitação também colabora para minimizar a ocorrência de sedimentação de precipitados do substrato e que inclusive podem ocasionar a solidificação. A manutenção demandada pela solidificação pode parar a operação do biodigestor e implicar a troca da manta plástica inferior, causando prejuízo considerável.

Deve-se discutir também sobre a efetividade da biodigestão neste modelo de biodigestor, pois provavelmente o digestato, efluente do biodigestor, ainda pode possuir carga orgânica significativa (Santos *et al.*, 2006). Especialmente sobre o fato de que não se tem, nem a agitação e nem o controle de temperatura do digestato. Também indicadores químicos e bioquímicos como D_{QO} e D_{BO} podem validar o questionamento feito, conforme (Yun *et al.*, 2018).

Sendo assim, acredita-se que a inserção de uma camada isolante entre as mantas plásticas inferiores de um biodigestor tubular semienterrado com o objetivo de diminuir perdas para solo é eficaz no período em que a temperatura do solo é menor que a temperatura do substrato, ou seja, em períodos com temperaturas mais elevadas como o verão. Ou quando o sistema de biodigestão possuir aquecimento.

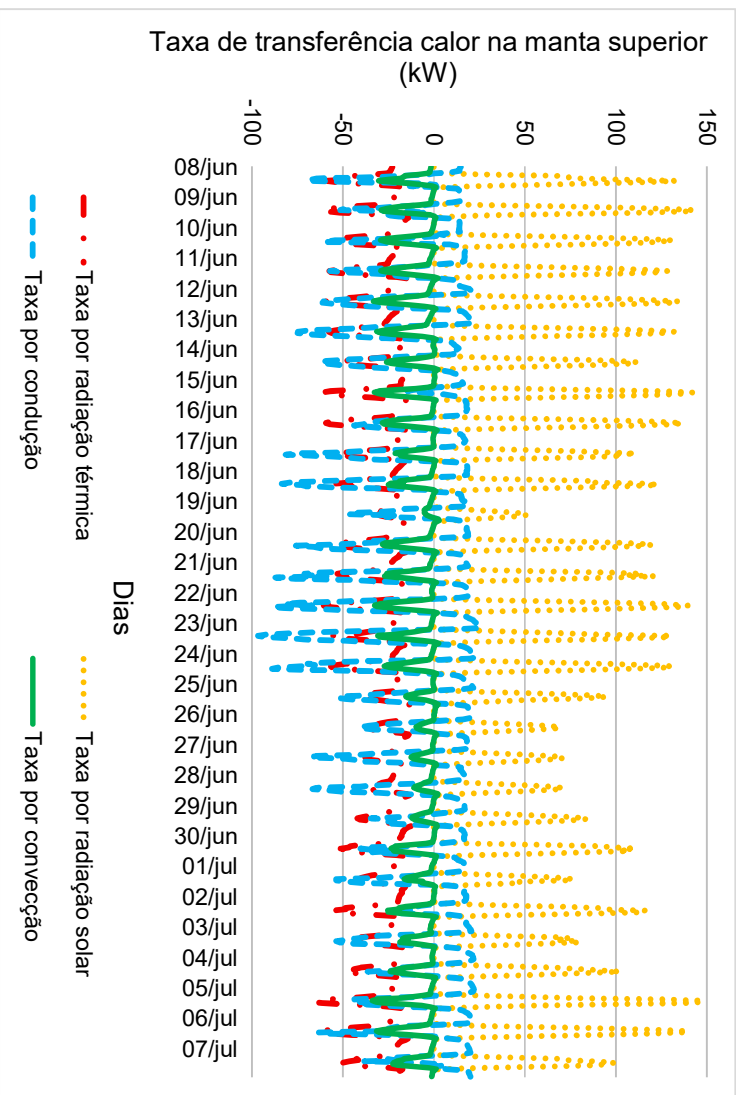
Este modelo de biodigestor tem como taxa de ganho de calor cerca de 76% e 84% proveniente da radiação solar, nos períodos simulados para inverno e verão, respectivamente. Ou seja, apenas 24 e 16% do total de ganho de calor vieram do solo e do meio ambiente externo. Sendo assim pode-se observar os valores das taxas de transferência de calor médias absorvidas pela manta superior do biodigestor para os períodos simulados no inverno e verão, 4,26 e 7,68 kW, respectivamente. Ou seja, as taxas de transferência de calor por radiação solar do verão foram cerca de 80% maiores do que as de inverno.

Pode-se notar que os ganhos para o verão são quase que duas vezes maior que os ganhos para o inverno. Desta forma, a utilização de uma manta superior com alta absorvância térmica na faixa do comprimento de onda da radiação solar é indispensável para uma maior eficiência de biodigestores desse modelo, principalmente em localidades que possuem altos níveis de irradiância solar.

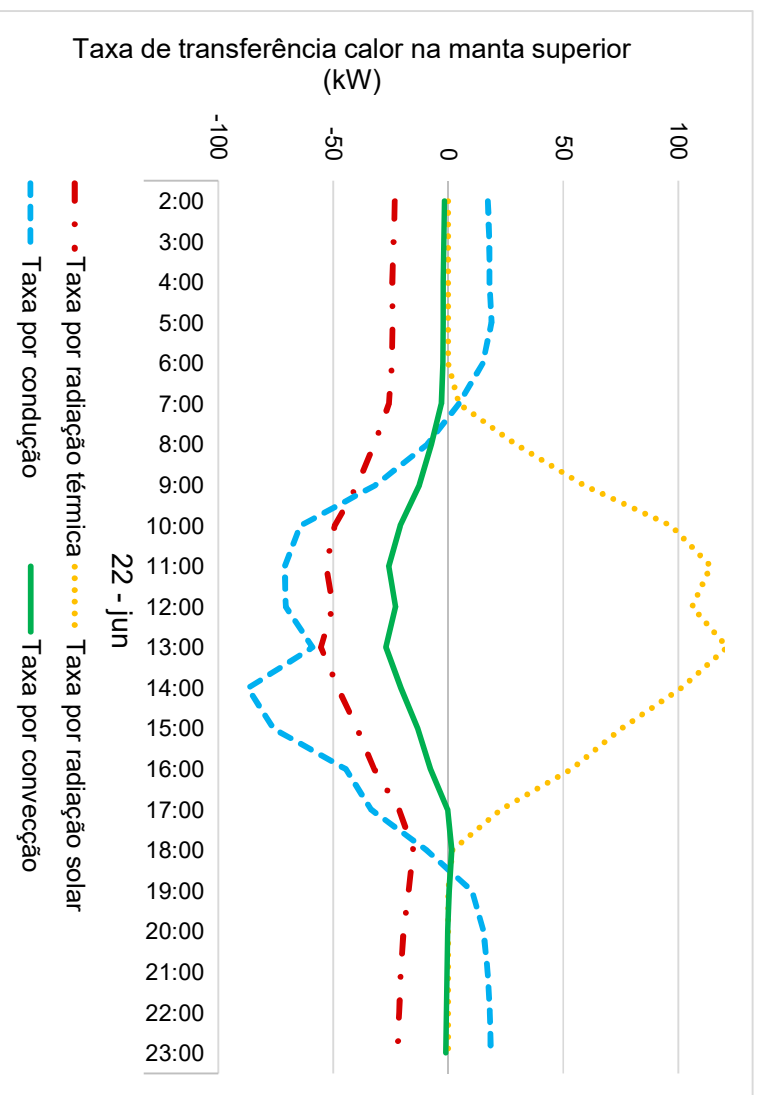
A Figura 3.8 apresenta a taxa de transferência de calor por radiação solar, radiação infravermelha, convecção e condução na manta superior do biodigestor para o período de (a) inverno, (c) verão e também a taxa horária de transferência de calor para o dia de solstício de (b) inverno dia 21/jun e (d) e verão dia 21/dez ambos para o ano de 2017, entre a manta superior e o meio interno e externo (q_1).

O *software* EPlus realiza o cálculo da radiação solar considerando, além das componentes citadas na seção de materiais e métodos, o fluxo de radiação solar refletida de superfície difusa do céu (W/m^2), o fluxo radiação solar refletida da superfície irradiada (W/m^2) e o fluxo de radiação solar refletida de superfície difusa do céu (W/m^2). Porém para o caso estudado apenas as taxas de radiação solar de raios incidentes, radiação solar difusa e radiação solar difusa no solo foram diferentes de zero, como mencionado anteriormente. Desta forma, a variável analisada foi a taxa de radiação solar incidente (kW) que é absorvida pela superfície do objeto durante o período de simulação, ou seja, o quanto de radiação a manta plástica superior externa do biodigestor absorve.

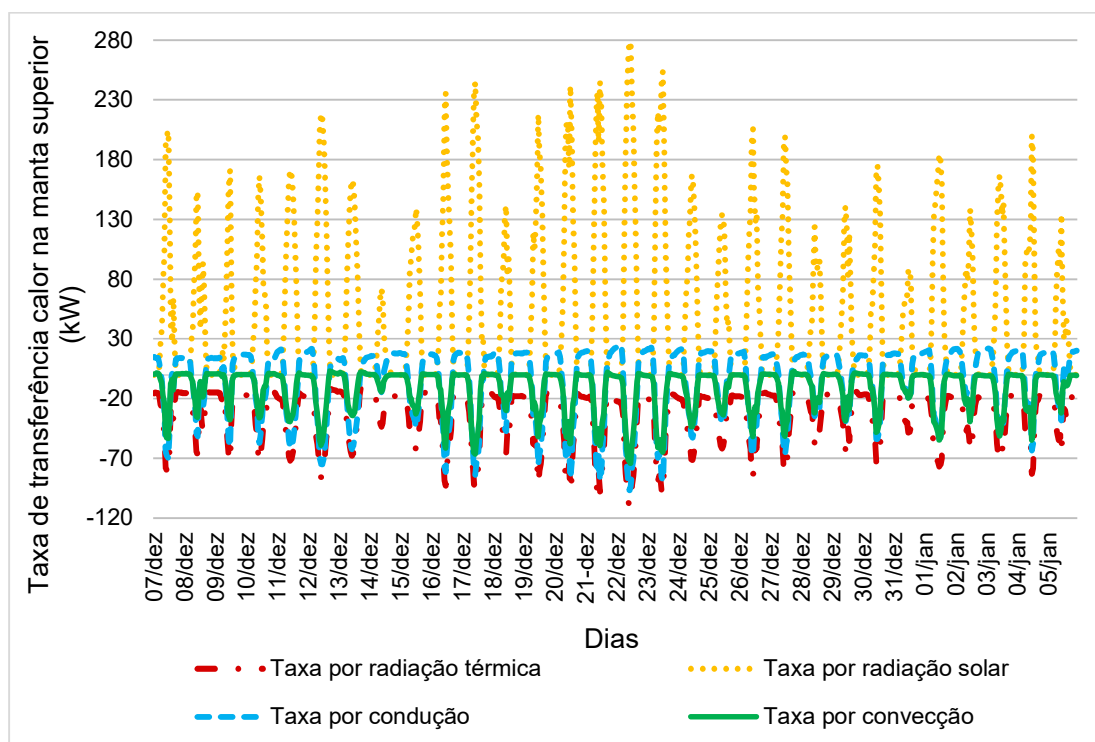
Nota-se, pela Figura 3.8 (a) e (c), que os valores positivos significam que a manta superior do biodigestor está recebendo calor do meio externo já os valores negativos a manta está perdendo calor. A manta superior recebe calor apenas por trocas térmicas advindas da radiação solar, da condução e alguns valores ínfimos devido a convecção. A radiação térmica infravermelha somente possui valores negativos, ou seja, essas são perdas devido à emissão de radiação da manta plástica superior. Uma possível medida para diminuir essas perdas é inserir uma dupla camada da manta plástica superior, como foi feito por Hreiz, Adouani, Jannot e Pons, Marie Noelle (2017). No entanto, a inserção de dupla camada de manta plástica diminui os ganhos de calor da radiação solar.



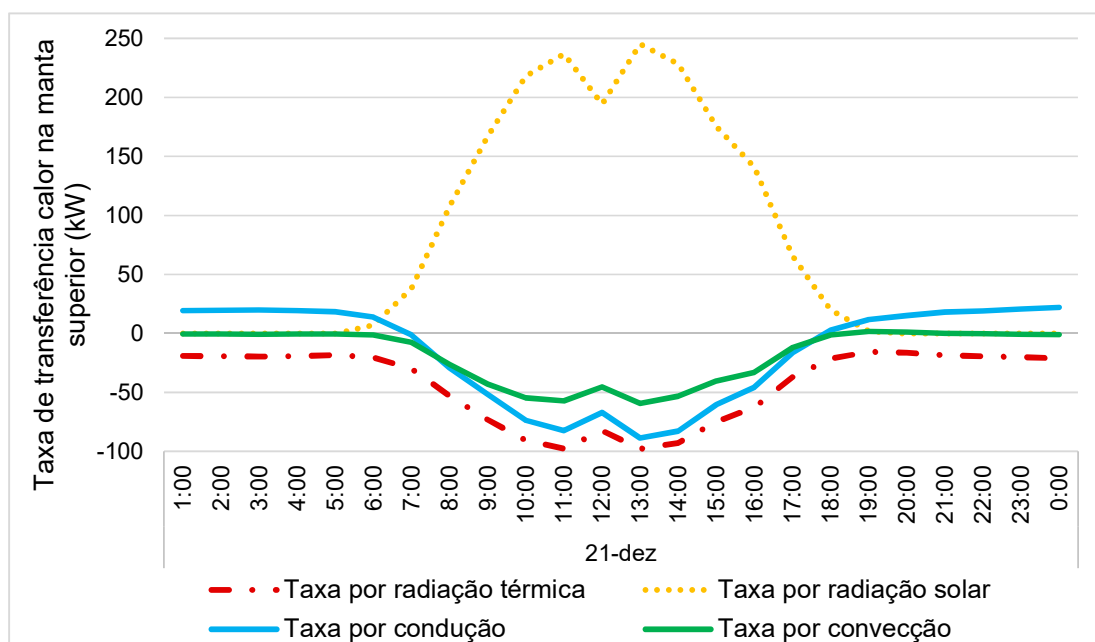
(a) Inverno



(b) Horária no solstício de inverno



(c) Verão



(d) Horária no dia do solstício de verão

Figura 3.8 – Taxas de transferência de calor entre a manta plástica superior do biodigestor e o meio externo e interno, nos períodos: (a) Inverno, (b) Horária no dia do solstício de inverno, (c) Verão e (d) Horária no dia do solstício de verão.

O projeto de biodigestores deve ser visto dos pontos de vista passivo e ativo. Do ponto de vista passivo tanto o estudo de materiais e suas propriedades térmicas, quanto da inclusão ou não de novas camadas podem ajudar na melhoria do *design* de biodigestores. Já a inclusão ou não de sistemas de agitação e de controle do aquecimento do substrato são considerados propostas de melhoria do *design* do ponto de vista ativo.

A Figura 3.8 (b) e (d) mostra a variação horária das trocas térmica da manta superior do biodigestor, para o solstício de inverno e verão, respectivamente. A localização temporal horária das perdas e ganhos é importante para determinação de medidas para otimizar o funcionamento do modelo estudado. Pode-se observar que o comportamento das taxas de calor da Figura 3.8 (b) e (d), são semelhantes distinguindo-se pelas amplitudes dos valores. Ao se localizar e quantificar diariamente as perdas pode-se adequar o sistema de aquecimento, a priori, ao comportamento térmico do biodigestor. Sendo assim, ao se automatizar e controlar um reator anaeróbio, existem diversas possibilidades de sistemas de agitação e de aquecimento, como foi estudado por (Elsgaard, Olsen e Petersen, 2016; Merlin *et al.*, 2012). Como o uso de diferentes tipos de agitadores, o uso de recirculação de digestato, de aeração, ou de diferentes formas de controle da temperatura como: externa, interna, constante e intermitente.

A automação e o controle devem sempre ser vistos sob as óticas de: efetividade do controle de variáveis ou de maximizar a produção.

Pode-se observar (Figura 3.8 b) que o biodigestor recebe (valores positivos) cerca 76 % do calor da radiação solar durante o fotoperíodo e, também durante a noite, por condução que pode ser devido às trocas realizadas entre o biogás e a manta superior. Na Figura 3.8 (d) este comportamento é semelhante, porém, o biodigestor recebe cerca 84 % de seus ganhos de calor da radiação solar.

Por outro lado, perde-se calor (valores negativos) por convecção forçada e natural (ventos e/ou diferença de temperaturas interna e externa) e também por radiação infravermelha. As perdas devido às ondas longas (infravermelha) ocorrem durante as 24 horas do dia, mas se intensificam durante o fotoperíodo. Já as perdas por condução e convecção ocorrem principalmente durante o fotoperíodo.

Durante o período de verão (Figura 3.8 c) as trocas térmicas entre a manta superior e o meio externo e interno se mantém com comportamento semelhante aos do inverno. Porém o ganho pela incidência de radiação solar é 68% maior que no período do inverno. As perdas também aumentam, porém, não é na mesma proporção, como será analisado no balanço geral a seguir.

Assim, reafirma-se a dependência da temperatura do interior do biodigestor e do substrato para com a radiação solar. Ademais, alerta-se para a necessidade de possíveis estratégias de novos *designs* com o objetivo de manter esse ganho de calor durante a noite, quando não há incidência de raios solares e também no inverno quando há redução da temperatura ambiente.

A Figura 3.9, apresenta o balanço energético detalhado, anteriormente, na Figura 3.8 contabilizando toda energia ganha e toda energia perdida pela manta plástica superior do biodigestor para o meio externo, durante o T_{RH} .

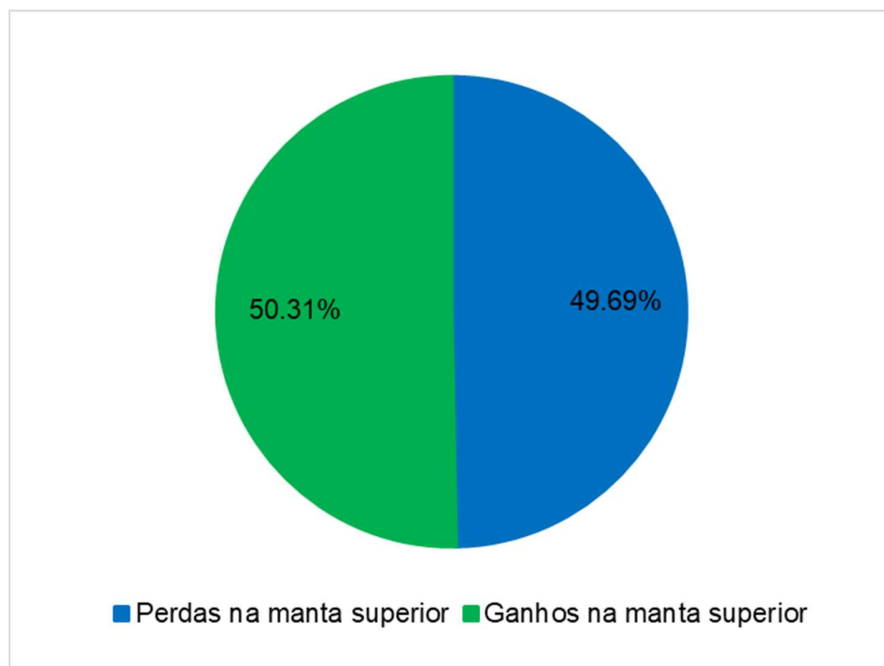
Pode-se observar na Figura 3.9 (a) que durante o período de simulação no inverno a manta superior teve um fluxo de calor do biodigestor para o meio externo, i.e., solo e ar de 76,96%. Assim, no período do inverno, a queda na temperatura do ar ambiente implica quedas nas temperaturas interna do biodigestor - biogás e substrato - (Figura 3.5 a), com um tempo de resposta significativo, i.e., cerca de 10 dias. Esse resultado mostra a importância de também se simular o comportamento da temperatura ambiente e do solo, um período antes e depois do escolhido, pois alterações atuais no biodigestor podem ser explicadas por variações ocorridas no meio externo anteriores as simuladas.

Frisa-se aqui que este comportamento com grande tempo de resposta se dá pelos seguintes fatos: camada de biogás de cerca de quatro metros de altura, que constitui uma camada de material altamente isolante para transferência do calor provindo da radiação solar e da grande capacidade térmica do solo e do substrato.

Já Figura 3.9 (b), apresenta um balanço de energia positivo. Isso pode ser explicado devido ao aumento de temperatura do meio ambiente, o que acarreta no aumento da temperatura do interior do biodigestor e do substrato.



(a) Inverno



Verão

Figura 3.9 – Balanço da taxa de transferência de calor por radiação, condução e convecção, na manta superior do biodigestor, para o período: (a) Inverno e (b) Verão.

Esses resultados afirmam a necessidade de se projetar um sistema de aquecimento para esse modelo de biodigestor. Desta forma, com o aquecimento, além do biodigestor operar na temperatura ótima para geração de biogás e para degradação de matéria orgânica, temperaturas médias do substrato, como as do período do verão, acima de 23 °C podem favorecer a maior eficiência de operação desse modelo de biodigestor, em climas tropicais como na região de estudo.

3.4.3 Validação da simulação

A Tabela 3.4 apresenta os erros relativos e absolutos entre as temperaturas simuladas e observadas no biodigestor de suinocultura de Teixeiras, MG, do substrato, do biodigestor, do ar ambiente e do solo, para análise de validação dos dados simulados, a cada 1,0 s.

Tabela 3.4 – Comparação de temperaturas dos dados simulados e observados.

		Substrato	Biodigestor	Solo
Erros relativos (%)	Mínimo	1,00%	0,00%	2,02%
	Máximo	16,83%	36,32%	4,00%
	Médio	6,54%	10,60%	2,91%
	Desvio padrão	0,042	1,11	0,004
Erros absolutos (°C)	Mínimo	0,27	0,0	0,59
	Máximo	4,43	9,00	1,17
	Médio	1,73	2,72	0,85
	Desvio padrão	1,11	1,65	0,13

A análise dos dados da Tabela 3.4 mostra que a simulação obteve resultados de erro médio relativo da temperatura do substrato de cerca de 6,5% ou de cerca de 1,7 °C. Já o erro relativo da temperatura do biodigestor foi de cerca de 10,6% ou de cerca de 2,7 °C. Os valores dos erros relativos e absolutos médios foram condizentes com os valores encontrados na literatura (Hassanein *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017). Alguns valores se distanciaram mais da média, como é o caso do erro máximo da temperatura do biodigestor, que atingiu 36,32%, o que implica que está

simulação deverá ser aperfeiçoada. Porém, como um todo, a simulação obteve um comportamento similar à de outros estudos.

Os valores encontrados para o desvio padrão implicam que os dados analisados não se afastam da média. Sendo assim as temperaturas simuladas estão próximas das temperaturas medidas experimentalmente, o que é um indício da qualidade da simulação.

3.5 Discussão Final

Novos *designs* devem incluir: (i) novos materiais construtivos; (ii) configuração e tecnologia; (iii) diferentes fontes de biomassa; e (iv) uso de diferentes arranjos produtivos.

- (i) Novos materiais construtivos: plástico, metais, material isolante, entre outros;
- (ii) Configuração e tecnologia: uma segunda camada da manta superior, uma camada isolante entre a manta inferior e o solo, a incorporação de sistemas de recirculação e de aquecimento, também novas configurações do modelo para pesquisar novos formatos como o cilíndrico e/ou oval;
- (iii) Fontes de biomassa: resíduos agrícolas, agroindustriais, de estações de tratamento de esgotos, sólidos urbanos, produção de biomassa para fins energéticos e combinação das fontes listadas; e
- (iv) Arranjos produtivos: condomínios de bioenergia, alimentação de biomassa de forma contínua ou por batelada.

3.6 Conclusão

Há poucos trabalhos referentes a simulação com biodigestores de fluxo tubular com manta térmica o que tem atrasado o avanço deste modelo que é o predominante nas áreas rurais brasileiras. Portanto, os resultados apresentados neste trabalho são de grande relevância para otimizar os projetos destes tipos de

biodigestores, possibilitando operação de reatores mais eficientes e mais produtivos.

A simulação confirmou muito do conhecimento sobre o comportamento dos biodigestores tubulares com manta plásticas, como por exemplo, a dependência de sua eficiência com a radiação solar, mas também apontou alguns pontos inovadores. Como o comportamento da temperatura da manta inferior do biodigestor, que varia muito pouco em relação a temperatura do meio externo e o tempo de resposta do substrato em relação ao meio externo.

É importante ressaltar que apesar das limitações do *software* de domínio público, utilizado, i. e. o *Energy Plus*, como não simular o regime dinâmico do substrato, ele possui a capacidade de realizar a simulação em reatores e de detalhar o balanço energético, portanto, de apontar melhorias se os fluxos de energia e/ou o *design* forem diferentes.

A simulação com este modelo se mostrou muito condizente com o real, uma vez que foi possível modelar o comportamento térmico do substrato e do solo, pontos negligenciados por outros autores. Vale lembrar que a modelagem possui uma limitação por não considerar a liberação e consumo de energia por partes da *arqueas*, este pode ser um novo item a ser acrescentado na simulação. É importante ressaltar que a simulação foi feita especificamente para solo e clima do município de Viçosa, MG, e para o modelo da suinocultura citada no estudo.

3.7 Referências bibliográficas

ALLEN, R. G. *et al.* **The ASCE standardized reference task committee on standardization of reference evapotranspiration equation.** Reston, VA: [s.n.].

ALMEIDA, C. *et al.* 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, n. December 2015, p. 601–608, 2017.

ALMEIDA, R. C. **Memorial descritivo e de cálculo- Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário.** Gavião Peixoto - SP: [s.n.].

APPELS, L. *et al.* Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4295–4301, 2011.

ARIKAN, O. A.; MULBRY, W.; LANSING, S. Effect of temperature on methane production from field-scale anaerobic digesters treating dairy manure. **Waste Management**, v. 43, p. 108–113, 2015.

BARROS, T. D. **Árvore do Conhecimento: Biodigestor Tubular**. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fj06su h302wyiv802hvm3ja3fm10a.html#>>. Acesso em: 24 jan. 2019.

CHEN, Y. R. Kinetic Analysis of Anaerobic Digestion of Pig Manure and its Design Implications. **Agricultural Wastes**, v. 8, p. 65–81, 1983.

CLEMENTS, E. D. **Three dimensional foundation heat transfer modules for whole-building energy analysis**. [s.l.] The Pennsylvania State University. Pennsylvania, US, 2004.

CURRY, N.; PILLAY, P. Integrating solar energy into an urban small-scale anaerobic digester for improved performance. **Renewable Energy**, v. 83, p. 280–293, 2015.

ELSGAARD, L.; OLSEN, A. B.; PETERSEN, S. O. Temperature response of methane production in liquid manures and co-digestates. **Science of the Total Environment**, v. 539, p. 78–84, 2016.

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

HOLM-NIELSEN, J. B.; SEADI, T. AL; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, p. 5478–5484, 2009.

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.

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.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 4. ed. Nova Iorque: [s.n.].

INMET -INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 6 jan. 2019.

KARIYAMA, I. D.; ZHAI, X.; WU, B. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review. **Water Research**, v. 143, p. 503–517, 2018.

KUSUDA, T.; ACHENBACH, P. K. **Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States**. Washington: [s.n.].

LATHA, K. *et al.* Mixing strategies of high solids anaerobic co-digestion using food waste with sewage sludge for enhanced biogas production. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 388–400, 2019.

LIU, Y. *et al.* Investigation on the heat loss characteristic of underground

household biogas digester using dynamic simulations and experiments. **Biosystems Engineering**, v. 163, p. 116–133, 2017.

MACHADO, G. B. **Webinário – Biodigestores Automatizados**. Disponível em: <<https://portalresiduossolidos.com/webinario-biodigestores-automatizados/>>. Acesso em: 11 dez. 2018.

MARTÍ-HERRERO, J.; ALVAREZ, R.; FLORES, T. Evaluation of the low technology tubular digesters in the production of biogas from slaughterhouse wastewater treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 633–642, 2018.

MERLIN, G. *et al.* Importance of heat transfer in an anaerobic digestion plant in a continental climate context. **Bioresource Technology**, v. 124, p. 59–67, 2012.

MORSELLI, T. B. G. A. **Biologia do solo**. Pelotas, Rio Grande do Sul, BR: [s.n.].

NGUYEN, D. *et al.* Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 193, p. 513–522, 2015.

NREL, N. R. E. L.; DOE, U. S. D. OF E.; BTO, B. T. O. **Energy Plus documentation**. Disponível em: <<https://www.energyplus.net/>>. Acesso em: 8 jan. 2019.

RESENDE, B. C. **Influência do solo no desempenho térmico de habitações com cômodos subterrâneos**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

SAKAR, S.; YETILMEZSOY, K.; KOCAK, E. Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment - A literature review. **Waste Management and Research**, v. 27, n. 1, p. 3–18, 2009.

SANTOS, G. F. DOS; REIS, H. F. A. F. **Avaliação de biodigestores canadenses para o tratamento de efluentes de suinocultura: um estudo de caso no Brasil**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2018.

SANTOS, K. D. *et al.* Utilização de esgoto tratado na fertirrigação agrícola. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. Suplemento, n. 1, p. 7, 2006.

SILVA, J. E. P. **Avaliação técnica e econômica de um biodigestor de fluxo tubular: estudo de caso do modelo implantado no ETEC “Orlando Quagliato” em Santa Cruz do Rio Pardo, SP**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2016.

SILVA, M. A. V. **Meteorologia e climatologia**. 02. ed. Recife: Versão Digital, 2006.

SINUÉLO. **Biodigestor**. Disponível em: <<http://sinueloagropecuaria.com.br/instalacoes-agropecuarias/revestimentos-de-geomembrana/biodigestor/>>. Acesso em: 9 nov. 2018.

SOUZA, C. F.; CAMPOS, J. Avaliação do tempo de retenção hidráulica, revolvimento e temperatura em biodigestores operando com dejetos de suínos. **Rev. Bras. Agroecologia**, v. 2, n. 1, p. 1–4, 2007.

SOUZA, J.; ROSSINI, E. G.; SCHAEFFER, L. **Materiais para fabricação de biodigestores**. **Materiais para fabricação de biodigestores**. **Anais...Itajubá-MG-BR**:

2013

STERLING, R. L. *et al.* **Assessment of soil thermal conductivity for use in building design and analysis**. Minnesota: [s.n.].

UFV-CETEC-UFLA-FEAM. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

WALTON, G. N. **Passive Solar Extension of the Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST)**. Champaign, IL: [s.n.]. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a099054.pdf>>.

YU, L. *et al.* Popularizing household-scale biogas digesters for rural sustainable energy development and greenhouse gas mitigation. **Renewable Energy**, v. 33, n. 9, p. 2027–2035, 2008.

YUN, S. *et al.* Use of bio-based carbon materials for improving biogas yield and digestate stability. **Energy**, v. 164, p. 898–909, 2018.

Capítulo 4: Simulação com dinâmica dos fluidos computacional do comportamento termodinâmico de biodigestor tubular

4.1 Introdução

Nos últimos anos, técnicas que adotam processos de digestão anaeróbia (DA) vem sendo amplamente utilizadas para o tratamentos de resíduos (López-jiménez *et al.*, 2015). Por meio destas, matérias orgânicas complexas, como resíduos agrícolas, são convertidas em compostos mais simples, como metano e dióxido de carbono (compostos do biogás), fósforo e nitrogênio (elementos biofertilizantes), (Kinyua *et al.*, 2016; Mohammadrezaei, Zareei e Khazaei, 2018; Sajjadi *et al.*, 2016). Segundo Sajjadi (2016), mais da metade da água doce disponível no mundo está poluída devido principalmente ao não tratamento de resíduos domésticos e industriais.

Os biodigestores tem sido uma opção vantajosa no tratamento de resíduos, despertando o interesse da comunidade acadêmica em pesquisar meios de se otimizar processos anaeróbios. Tal vantagem é explicada pelo fato dos biodigestores darem um destino adequado a resíduos prejudiciais ao meio ambiente e, ainda, utilizá-los como fonte de fertilizantes e de energia, seja elétrica ou térmica (Arif *et al.*, 2018).

Dentre as abordagens utilizadas para otimizar o processo de biodigestão anaeróbia, estão os estudos de comportamento termodinâmico dos biodigestores. O uso de ferramentas computacionais para simular este comportamento contribui para aumentar a velocidade do avanço tecnológico. O uso de simulação facilita a criação e a comparação de diferentes cenários de estudo e também diminui consideravelmente os custos relacionados as etapas de validação e experimentação, que dependem em parte de operações a serem realizadas diretamente na planta (Leonzio, 2018).

A técnica de simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*), ou dinâmica dos fluidos computacional, em português, tem se apresentado como uma ferramenta eficiente para estudar e avaliar os diferentes fenômenos que ocorrem no interior de

biodigestores. Meister *et al.* (2018) estudaram uma estação de tratamento de efluentes na Espanha, em que foi aplicada a equação de *Reynolds Averaged Navier-Stokes*, juntamente com o modelo de turbulência *k-ε*, para caracterizar o escoamento no interior de um biodigestor, considerando o substrato como sendo um fluido: (i) newtoniano; e (ii) não newtoniano. Assim observou-se zonas mortas no escoamento do fluido, ou seja, locais de baixa mistura e com mínimas reações metabólicas, confirmando a necessidade de se agitar melhor o substrato no interior do biodigestor para maior produção de biogás.

Tem se estudado também, a aplicação do CFD em diversos tipos de biodigestores como em lagoas anaeróbias, modelo de escoamento empistonado (*plug-flow*) e tanque agitado continuamente – CSTR. O autor indicou os principais parâmetros a serem modelados de cada tipo de reator, com o intuito de alcançar o maior rendimento em cada modelo (Wu, 2013).

Liu *et al.* (2017) realizaram uma simulação das trocas térmicas de um biodigestor subterrâneo doméstico na China com o *software Fluent*. Os autores compararam os resultados da simulação com dados experimentais e obtiveram um erro máximo do fluxo de calor médio de 5,9 %.

Hreiz *et al.* (2017) simularam um biodigestor agrícola semienterrado na França, aprimorando a modelagem ao inserir termos inéditos de transferência de calor, como as perdas de calor por radiação de ondas longas na superfície do biodigestor. Os resultados numéricos obtidos foram condizentes aos dados experimentais disponíveis. Hassanein *et al.* (2015) utilizaram o *software Energy Plus* para simular os efeitos da inserção de um sistema de aquecimento passivo em um biodigestor modelo chinês, no noroeste da China. O sistema de aquecimento se mostrou viável em regiões onde as temperaturas sejam superiores à -5 °C. O estudo apresentou 0,34 °C de diferença entre valores experimentais e simulados, que representa uma correlação satisfatória.

O tipo de biodigestor mais utilizado no Brasil, tendo sua maior parcela de aplicação nas granjas de suinoculturas, é o modelo de fluxo tubular com manta plástica, também conhecido como modelo canadense (Barros, 2008). Se trata de um modelo semienterrado onde 100% do substrato está separado do solo e do ar ambiente, por meio de manta plástica. A manta plástica, empregada nos

biodigestores canadenses, possui normalmente espessura entre 0,8 a 1,2 mm e usualmente é de PEAD. No Brasil há poucos casos de automação e controle deste modelo de biodigestor, o que compromete sua produção eficiente de biogás e de biofertilizante. Como dito anteriormente a temperatura do substrato e sua homogeneização são características essenciais para se eficientizar a digestão anaeróbia no interior de reatores.

4.2 Objetivos

4.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência de sistemas de aquecimento e recirculação no comportamento termodinâmico do biodigestor de fluxo tubular.

4.2.2 Objetivos específicos

- i. Modelar um sistema com um biodigestor modelo tubular e das condições de contorno envolvidas; e
- ii. Avaliar a o comportamento da temperatura do biodigestor com e sem sistemas de aquecimento e recirculação.

4.3 Material e Métodos

Neste trabalho foi utilizado o *software* ANSYS CFX versão acadêmica 19.1.

4.3.1 Modelagem de biodigestor e das condições de contorno

O biodigestor canadense simulado foi adotado por ser o modelo mais utilizado no Brasil, devido em grande parte as suinoculturas (Cervi, Esperancini e Bueno, 2010).

As dimensões utilizadas na modelagem do biodigestor de 250 m³, foram as da planta de tratamento de resíduos da suinocultura na Granja de Produção e de Melhoramento e Genética da Universidade Federal de Viçosa (Leandro e Maradini, 2018). Foi adotado este reator da Universidade para se realizar as simulações, por

ser um modelo em operação que trata de resíduos de suínos e também pela disponibilidade de se ter acesso aos dados operacionais necessários para a modelagem.

Os reatores de suinocultura possuem normalmente um formato semelhante ao de um tronco de pirâmide invertida, como é o caso do modelo em pesquisa. A largura da base maior possui 10,0 m já a base menor abaixo do nível do solo apenas 5,0 m, comprimento longitudinal de 15,0 m e possui 2,5 m de profundidade. A altura da manta onde se armazena o biogás gerado é de cerca de 2,5 m acima do nível do solo, como apresentada na Figura 3.1, no Capítulo 3. Para este estudo foi modelada a manta plástica com 1,0 mm de espessura e com propriedades do PEAD. A Figura 4.1 apresenta a vista em corte longitudinal do biodigestor da suinocultura modelado.

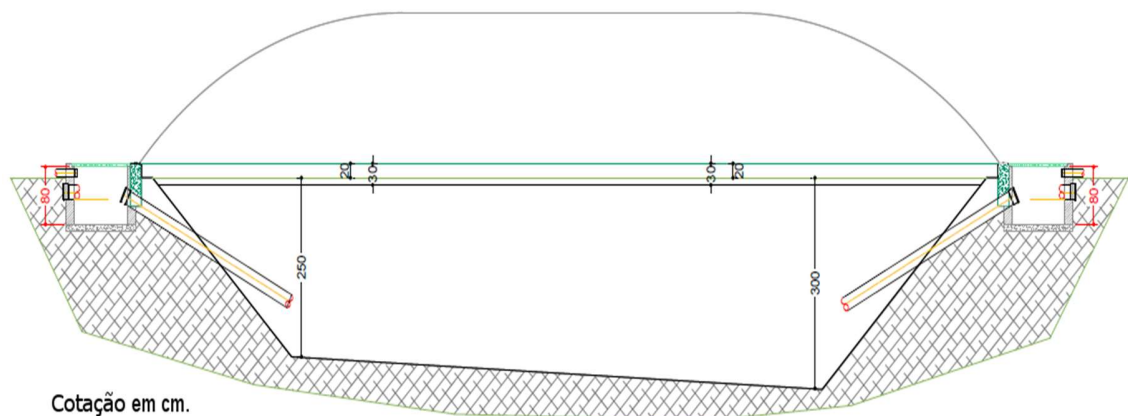
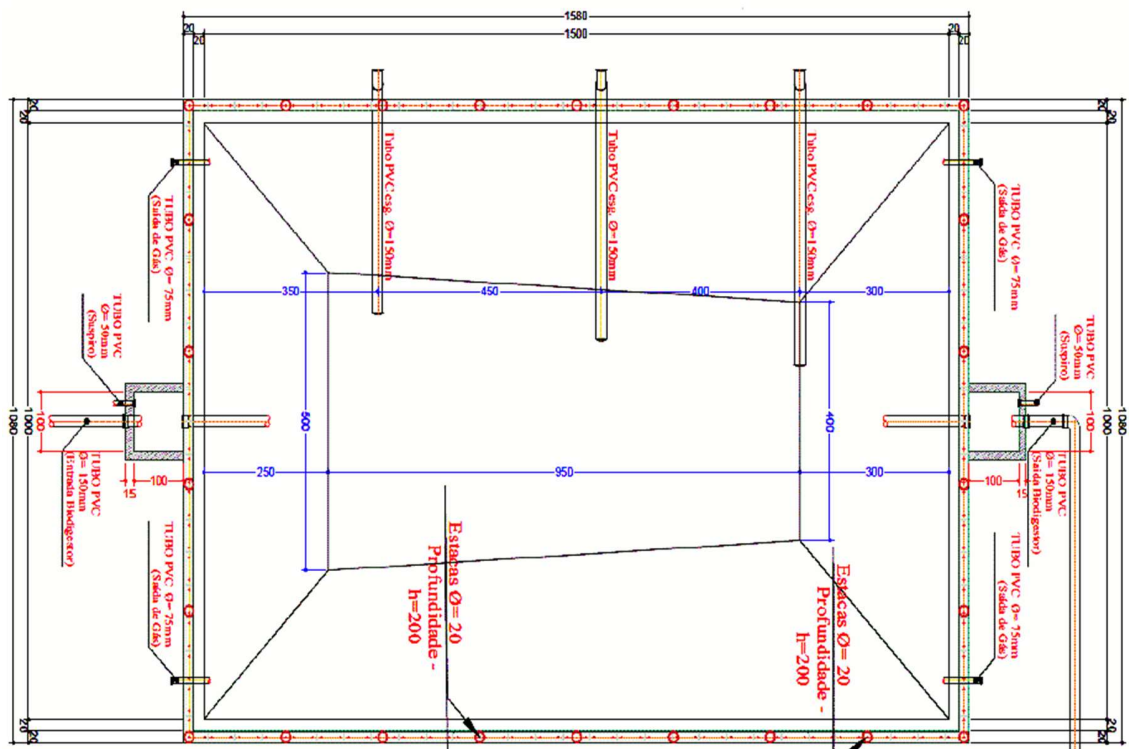


Figura 4.1 - Vista em corte longitudinal do biodigestor da suinocultura da UFV.

Os tubos de entrada e saída do substrato do reator possuem um diâmetro de 150 mm e estão localizadas nas extremidades longitudinais do biodigestor, uma ao norte e outra ao sul. Este modelo também possui três caixas para a inspeção do substrato localizadas na lateral esquerda do biodigestor com diâmetros de 150 mm. A Figura 4.2 mostra a localização desses pontos de inspeção do biodigestor, dos tubos de entrada e saída, na planta baixa do biodigestor.



Valores não cotados em cm.

Figura 4.2 – Planta baixa do biodigestor da granja de suínos da Universidade Federal de Viçosa (Leandro e Maradini, 2018).

A primeira equação governante utilizada na simulação foi a equação da continuidade, garantindo que os vetores de velocidades sejam livres de divergência em cada ponto (equação 4.1):

$$\nabla \cdot v = 0 \quad 4.1$$

em que v é o vetor velocidade absoluta do fluido, lembrando que o vetor velocidade possui componentes nas direções x , y e z .

Para analisar o comportamento da taxa de variação de v utilizou-se a equação da conservação da quantidade de movimento (equação 4.2):

$$\nabla(\rho v) = -\nabla(\rho v v) - \nabla p - \nabla \tau + F \quad 4.2$$

em que ρ é a massa específica, p a pressão de entrada do fluido, τ o tensor de tensão viscosa e F as forças atuantes no corpo, sendo que o último termo da equação 4.2 foi negligenciado para esse estudo como (Kariyama, Zhai e Wu, 2018; Lovato *et al.*, 2018).

O escoamento do substrato foi modelado com uma única fase com densidade e viscosidade constantes, como em Meister *et al.* (2018); Mohammadrezaei, Zareei e Khazaei (2018); Liu *et al.* (2017); Curry e Pillay, (2015) e Perrigault *et al.* (2012).

Sendo assim, as características adotadas para a modelagem do substrato são propriedades de fluido newtoniano à 23°C, como calor específico a pressão constante (c_p), condutividade térmica (k), massa específica (ρ), viscosidade dinâmica (μ). Para as propriedades da manta plástica de PEAD e para o solo utilizou-se propriedades uniformes (Tabela 4.1), conforme metodologia de Perrigault *et al.* (2012).

Tabela 4.1 - Propriedades termofísicas do substrato.

Material	Propriedades Termofísicas do fluido			
	ρ - massa específica (kg/m ³)	c_p - calor específico (J/kg K)	k - condutividade térmica (W/m K)	μ - viscosidade (Pa s)
Substrato	998	4186,8	0,58	0.001
Solo	2000	1550,0	1,58	-
Manta Plástica	950	1700,0	0,35	-

Fonte: Adaptado de Resende, 2017.

As simulações foram realizadas na condição de regime permanente, para se analisar as trocas térmicas durante a operação do biodigestor. Foi adotado que, as soluções da simulação devem convergir quando todos os resíduos estiverem abaixo de 10^{-4} e a convergência final é atingida quando os campos das velocidades, pressão e temperatura permanecerem constantes.

Nesse estudo foi aplicado o método de volumes finitos (MVF) para discretização e solução das equações governantes (Dapelo *et al.*, 2019; Meister *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018).

Foi realizado um estudo para o refinamento e convergência da malha do sistema para garantir a estabilidade da solução numérica. O refinamento consistiu em dois processos: (i) variação de parâmetros controlados da malha; e (ii) variação de *time stepping*.

O primeiro processo do refinamento consistiu que a malha usada na simulação foi não-estruturada, de formatos hexaédricos. O tamanho da malha foi controlado pelos parâmetros de proximidade, que fazem uma aproximação mais robusta da malha e de curvatura que modela com mais detalhes utilizando formas curvas, desta forma a resolução da malha possuiu mais opções de modelagem. Para melhor desempenho da solução foi aplicado um nível alto de suavização (Meister *et al.*, 2018).

O segundo processo do refinamento consistiu na variação dos passos do tempo mínimo, (do inglês *time stepping*), $\Delta t_{\min} = 3,0$ s, calculado como (ANSYS, 2011), de $0,1 \Delta t_{\min}$; $1,0 \Delta t_{\min}$; Δt_{\min} ; $10 \Delta t_{\min}$; $100 \Delta t_{\min}$; $1000 \Delta t_{\min}$; e $10000 \Delta t_{\min}$ [s]. Os tempos de processamento foram medidos para o máximo de 1000 iterações ou até o sistema convergir. Para cada combinação de malha e *time stepping*, foi simulado a velocidade de entrada e saída do reator e analisou-se o erro relativo percentual em comparação com as velocidades de entrada e saída calculadas por método analítico, que devem possuir o mesmo valor para sistemas em regime permanente, i. e. 0,026 m/s para este estudo. Também se analisou o tempo de simulação de cada caso bem como o número de iterações necessárias para que o sistema atingisse a convergência ou não.

Foi calculado o número de Reynolds (*Re*) para determinar o tipo de escoamento, laminar ou turbulento. O cálculo para *Re* foi feito pela equação 4.4:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad 4.3$$

em que, μ viscosidade dinâmica, D_h o diâmetro hidráulico equivalente do biodigestor, que é calculado por meio da seção transversal e do perímetro do biodigestor, neste caso foi igual a 4,4 m.

4.3.2 Simulação de sistemas de aquecimento e recirculação

Para a modelagem do substrato no *software* CFX foi necessário, além das propriedades térmicas, inserir a velocidade e a temperatura que o fluido entra no biodigestor. A velocidade, 0,026 m/s, foi calculada a partir da vazão e da área da seção transversal do tubo de entrada. Foi adotada a vazão de biodigestor de 250 m³ da UFV. Já a temperatura de entrada do fluido foi considerada igual à temperatura ambiente média anual para o Brasil, cerca de 24 °C, pois o modelo estudado é o predominante no país.

Foi proposto um sistema de aquecimento e recirculação para ser implementado no biodigestor. O sistema de aquecimento consistiu em um trocador de calor externo ao reator. O afluente foi aquecido, por meio de trocador de calor e de sistema de motobomba, na saída de umas das caixas de inspeção a 40 °C e retorna ao reator pelas outras duas caixas de inspeções, mantendo o volume do biodigestor constante. Foi escolhido 40 °C por ser a temperatura limite para a ótima metabolização do substrato por parte das arqueas mesofílicas, visando assim não prejudicar a biodigestão.

Para realizar a recirculação e o aquecimento do substrato foram supostos: trocador de calor; sistema de aquecimento do biogás; conjunto motobomba; controle elétrico; válvulas e registros hidráulicos e tubulação de sucção e de recalque. O recalque e a sucção foram feitos através das três caixas de inspeção do biodigestor. Os sistemas de recirculação e aquecimento foram simulados para permitir a automação, tendo em vista haver recirculação dos fluidos de aquecimento e do substrato, ou seja, permitem a retroalimentação quanto temperatura e recirculação. O substrato foi succionado em duas caixas de inspeção a velocidade de 0,037 m/s em cada e recalcado primeiramente para o trocador de calor onde foi aquecido à temperatura de 40 °C, após retornou ao biodigestor, por outra caixa de inspeção a velocidade de 0,074 m/s. Tais velocidades foram adotados de acordo com a vazão e dimensões do conjunto motobomba autoaspirante normalmente utilizado em suinoculturas para bombeamento de substrato.

A Figura 4.3 apresenta a vista inferior em planta baixa do biodigestor modelado, com suas dimensões, a localização das três caixas de inspeção, também

chamado de tubos de inspeção, na lateral esquerda e os tubos de entrada e saída do reator.

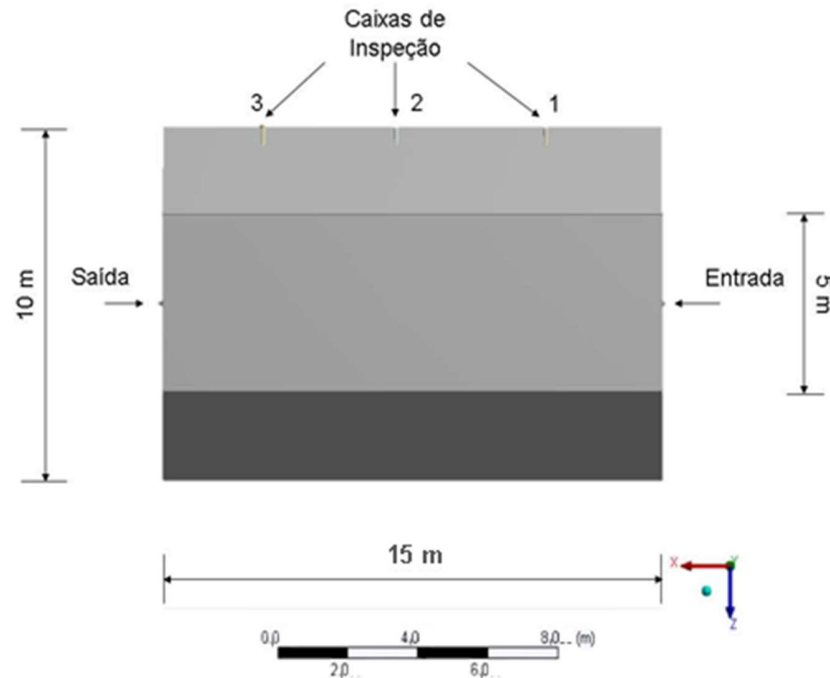


Figura 4.3 - Vista inferior da planta baixa do biodigestor modelado.

O primeiro Caso simulado foi o sem recirculação e sem aquecimento, para se avaliar funcionamento padrão do sistema, denominado de Caso (0).

Os próximos casos contaram com a inserção do sistema de recirculação e aquecimento, de duas formas de recirculação:

- (i) Succionar o fluido pelas caixas de inspeção 2 e 3, aquecer e depois recalcar pela caixa de inspeção 1; e
- (ii) Succionar o fluido pelas caixas de inspeção 1 e 3, aquecer e depois recalcar pela caixa de inspeção 2.

A Figura 4.4 mostra a proposta de acoplamento do biodigestor com o sistema de recirculação e aquecimento. Pode se observar o sentido do escoamento do substrato no interior do biodigestor, a sucção e o recalque do conjunto motobomba, a localização das tubulações e do trocador de calor.

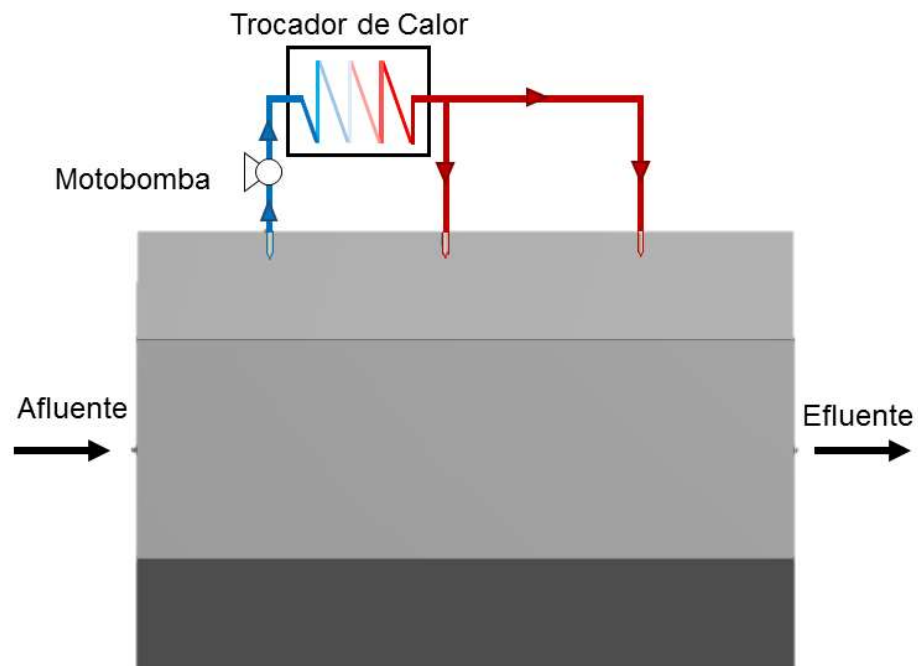


Figura 4.4 - Representação esquemática do sistema de recirculação e aquecimento do biodigestor para o Caso (i).

Algumas considerações foram feitas para se modelar o sistema no CFX:

- (i) A transferência de calor por ondas de radiação longas entre o solo e os objetos próximos foi desconsiderada (Perrigault *et al.*, 2012);
- (ii) Apesar de existirem reações endotérmicas e exotérmicas durante a biodigestão anaeróbia, a geração de calor microbiano foi desconsiderada, uma vez que a energia gerada pode ser considerada insignificante (Kinyua *et al.*, 2016);
- (iii) O calor transportado pela geração de biogás durante a fermentação foi desconsiderado; e,
- (iv) O substrato no digestor foi considerado como fluido com propriedades semelhantes às da água (Hreiz *et al.*; 2017); Liu *et al.*, 2017); Curry e Pillay; 2015).

Para avaliação da homogeneização do substrato, ou seja, a presença ou não de zonas mortas e de região(ões) com baixo escoamento, utilizou-se o monitoramento por meio de gradientes de velocidade absoluta G (s^{-1}) (equação 4.4). Em outras palavras, o gradiente de velocidade foi analisado para se determinar o

nível de mistura do fluido (Bridgeman, 2012; Bridgeman, Jefferson e Parsons, 2010; Sindall, Bridgeman e Carliell-Marquet, 2013).

Foi adotado o sistema de coordenadas cartesianas com os componentes de velocidade u , v e w nas direções x , y e z , respectivamente, sendo que o gradiente de velocidade absoluta é definido pela (equação 4.4):

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)^2} \quad 4.4$$

Segundo (Bridgeman, Jefferson e Parsons, 2010) o gradiente de velocidade pode ser considerado como uma medida da taxa de deformação angular de um volume elementar resultante da aplicação de forças na superfície tangencial. Assim, foi definido neste estudo como a raiz quadrada do gradiente de velocidade em um tanque que envolve certa mistura.

Para se relacionar o estudo deste modelo com outros encontrados na literatura, foi aplicado um fator de relação entre a velocidade (v) e comprimento (L) dos reatores a serem comparados como na equação 4.5,

$$\frac{v_1}{L_1} \sim \frac{v_2}{L_2} \quad 4.5$$

em que, v_1 e L_1 , são características do modelo base (referência) e v_2 e L_2 são características do modelo simulado.

4.4 Resultados e Discussão

4.4.1 Modelagem do biodigestor e das condições de contorno

Ressalta-se que as dimensões do reator simulado são as comumente encontradas em biodigestores de suinoculturas no estado de Minas Gerais. Porém, possui capacidade de 250 m³ de substrato, sendo 4 vezes menor do que a média encontrada.

O método de volume finitos se mostrou apropriado no desenvolvimento do estudo pois é um método consistente, possui propriedades de conservação e pode-se operar com malhas não estruturadas (Dapelo *et al.*, 2019; Meister *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018).

O teste de refinamento de malha tem por objetivo otimizar a malha a ser utilizada durante as simulações da pesquisa (Figura 4.5). Deve-se evitar utilizar uma malha muito refinada, para não se ter prolongados tempos de simulação, por outro lado, a modelagem da malha também não pode ser muito robusta, o que poderia gerar falta de exatidão nas soluções.

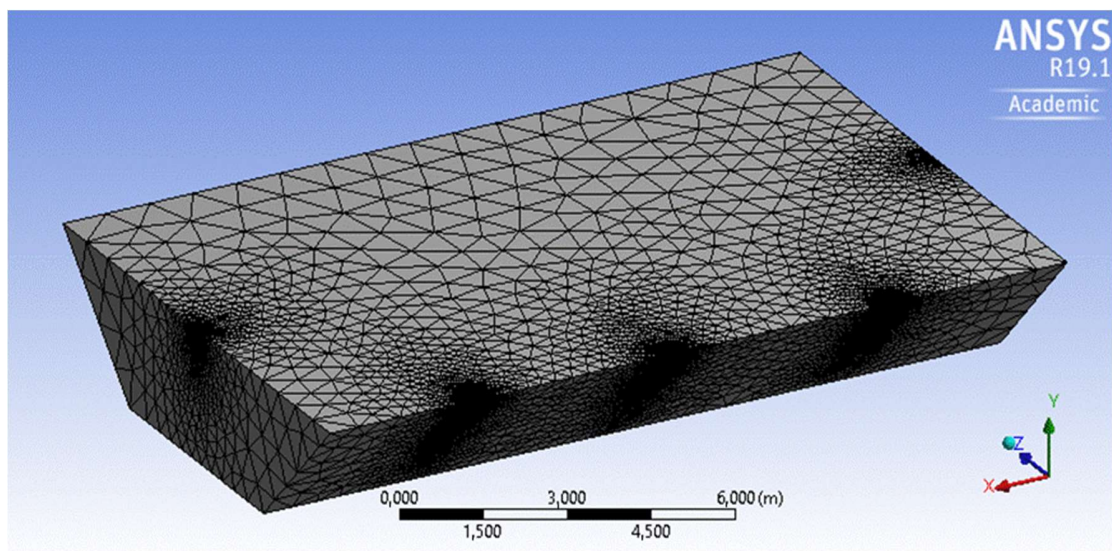


Figura 4.5 – Malha final da modelagem do biodigestor.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados para o teste de convergência de malha. Foram calculados os valores da velocidade de entrada e saída do biodigestor e comparados, por meio de erro percentual relativo, aos valores simulados.

Ao se simular o *time-stepping* para valores abaixo de $10 \Delta t_{\min}$ s, o sistema não alcançou a convergência (Não conv.), como apresentado na Tabela 4.2. Pode-se observar que foi atingido o máximo número de iterações (n° it.) permitido, i. e. 1000.

Tabela 4.2 – Especificações da malha e tempo de simulação.

MALHA	Δt (s)	$v_{entrada}$ prevista (m/s)	v_{saida} prevista (m/s)	Erro $v_{entrada}$ (%)	Erro v_{saida} (%)	Nº it.	Tempo de simulação (h:min:s)
	30	Não conv.	Não conv.	-	-	1000	00:12:10
<i>Proximity</i>	300	0,02662	0,02027	2,38%	22,04%	439	00:06:24
	3000	0,02662	0,02027	2,38%	22,04%	51	00:00:39
	30000	0,02662	0,02027	2,38%	22,04%	27	00:00:21
<i>Curvature</i>	30	0,02645	0,02877	1,73%	10,65%	261	00:31:45
	300	0,02644	0,02862	1,69%	10,08%	58	00:12:38
	3000	0,02644	0,02862	1,69%	10,08%	25	00:03:17
	30000	0,02644	0,02862	1,69%	10,08%	21	00:02:35
<i>Proximity e Curvature</i>	30	Não conv.	Não conv.	-	-	1000	01:33:32
	300	0,02646	0,02842	1,73%	8,23%	70	00:06:36
	3000	0,02645	0,02805	1,73%	7,88%	24	00:02:09
	30000	0,02645	0,02805	1,73%	7,88%	25	00:02:06

A malha controlada apenas pelo *proximity* possuía 16.981 nós e 88.028 elementos, já a malha controlada apenas pelo *curvature* possuía 96.363 nós e 525.928 elementos. Desta forma, pode-se afirmar que a malha do método *curvature* possui um maior refinamento do que a malha pelo método *proximity*.

Analisando os erros relativos percentuais (erro%) obtidos utilizando ambas as malhas, pode-se observar que neste caso a malha mais refinada alcançou melhores resultados por apresentar menores erros, porém, demorou um maior tempo para a solução convergir, por exemplo com *time-stepping* igual a 3000 s (50 min), a malha *proximity* convergiu em aproximadamente 40 s (0,67 min) já a *curvature* em 120 s (2 min).

Como pode se observar há uma diferença, três vezes maior, quando ao tempo de simulação entre os métodos de geração de malha, desta forma optou-se por simular com a malha controlada pelo “*Curvature e Proximity*” pois apresentou os menores erros e um menor tempo de simulação, para o *time stepping* 1000 Δt_{min} , i. e de 3000 s.

Por fim, a malha adotada foi a que apresentou maior simplicidade e precisão. A superfície da malha adotada no estudo apresentou 97.721 nós e 532.628

elementos e foi o método que alcançou os menores erros com menor tempo de simulação.

4.4.2 Implementação de sistemas de aquecimento e recirculação

O sistema de aquecimento consiste em um trocador de calor externo ao reator, que pode utilizar como fonte de energia biomassas presentes na suinocultura bem como o próprio a queima do próprio biogás. A necessidade de se implementar um trocador de calor externo ao biodigestor é devido à falta de acesso ao seu interior, uma vez que seria inviável inserir um agitador em seu interior, para a recirculação.

O primeiro caso a ser analisado foi o comportamento do fluido no interior do biodigestor na ausência de recirculação e aquecimento, Caso (0).

Ao se analisar o campo de velocidade no interior do biodigestor para o Caso (0) pode-se observar que velocidades variam de zero às velocidades de entrada e saída, cerca de 0,028 m/s próxima à entrada do tubo, como mostrado na (Figura 4.6).

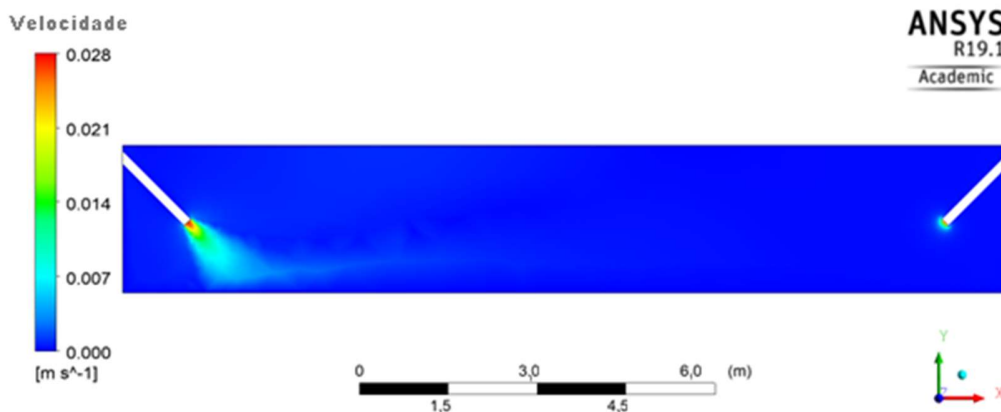


Figura 4.6 – Comportamento da velocidade no interior do biodigestor, desde o tubo de entrada (esquerda) até o tubo de saída (direita) para o Caso (0).

Quando o fluido entra no reator ele desacelera ao entrar no reservatório de substrato do biodigestor, que por sua vez está praticamente inerte quanto a velocidade, assim o fluido vai entrando em equilíbrio dinâmico e escoar a uma

velocidade baixa e constante até sair no lado oposto do reservatório de substrato do biodigestor.

Essa diferença de velocidade entre o escoamento do fluido no interior do tubo de entrada e do reator, gera uma pequena recirculação localizada, porém não é o suficiente para agitar todo o volume.

Por meio da análise das linhas de corrente pode-se verificar qual o comportamento do fluido ao sair do tubo de entrada do biodigestor até o tubo de saída. A Figura 4.7 apresenta a vista em planta e em corte longitudinal das linhas de corrente do escoamento do fluido, respectivamente.

A avaliação da recirculação pode ser feita tanto pela análise das linhas de corrente, quanto pela análise do gradiente de velocidade. A Figura 4.7 mostra o resultado das linhas de corrente, onde se pode notar que na ausência de sistema de recirculação há zonas, como as extremidades do reator, que não são praticamente misturadas.

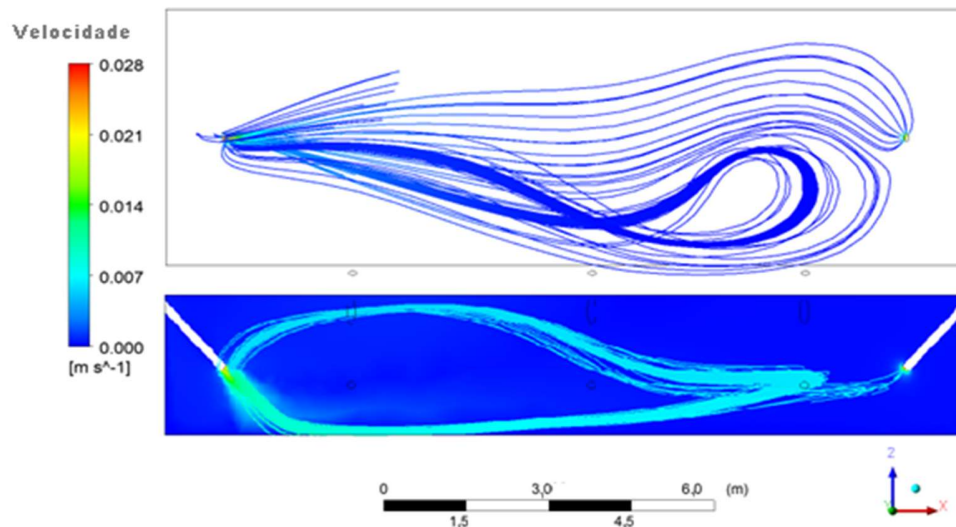


Figura 4.7 – Vista em planta baixa e em corte longitudinal das linhas de corrente do escoamento do substrato para o Caso (0).

Já pela análise do gradiente de velocidade, pode-se concluir para o Caso (0) que praticamente não ocorreu mistura do fluido, pelo baixo valor do gradiente de velocidade encontrado, i.e. , $0,210 \text{ s}^{-1}$, como no caso de Meister *et al.* (2018) que

alcançou um gradiente de velocidade igual a $0,5 \text{ s}^{-1}$, para um sistema sem recirculação.

É importante também ressaltar que as linhas de corrente do escoamento apresentadas na Figura 4.7 (vista em planta baixa) abrangem somente o centro do biodigestor, ou seja, a base central do biodigestor (5,0 m) e todo o comprimento (15,0 m), vista em planta baixa. Lembrando que as dimensões completas do biodigestor visto em planta baixa são 15 m de comprimento por 10 m de largura.

É consenso entre os pesquisadores que a correta agitação do fluido, otimiza a degradação do substrato por parte dos microrganismos, sendo possível a maior geração de biogás e de biofertilizantes, em outras palavras, a recirculação ou agitação do substrato pode tornar mais eficientes biodigestores (Leonzio, 2018; López-jiménez *et al.*, 2015; Rasouli *et al.*, 2018; Wu, 2011).

A seguir foram analisados os casos (i) e (ii) com o objetivo de avaliar com qual deles se obtém o melhor nível de mistura e de distribuição mais uniforme de temperatura.

A Tabela 4.3 apresenta as temperaturas mínimas, médias e máximas, o desvio padrão das temperaturas simuladas e também o gradiente de temperatura da mistura. Pode-se observar que para o Caso (0) a temperatura mínima, média e máxima foram as mesmas, todas em torno de 24°C , como era esperado devido à ausência dos sistemas de aquecimento e recirculação.

Tabela 4.3 - Distribuição da temperatura, gradiente de velocidade e desvio padrão da temperatura.

	Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Gradiente de velocidade \bar{G} (s^{-1})	Desvio padrão σ
Caso (0)	24,15	24,15	24,15	0,210	0,004
Caso (i)	24,15	33,26	40,15	1,747	0,446
Caso (ii)	24,15	33,43	40,15	1,541	0,510

Com o sistema de recirculação o gradiente de velocidade aumentou em cerca 700 %, comparando o Caso (0) com o Caso (i), o que implica que no Caso (i) o fluido está com uma melhor mistura e também possui melhor homogeneidade na

temperatura, e como consequência pode produzir biogás em maior quantidade e qualidade (Hulle, Van *et al.*, 2014).

Pode-se observar também que no Caso (i) são formados dois vórtices de escoamento (Figura 4.8). Esses vórtices são o encontro do escoamento da entrada do biodigestor com a recirculação proveniente da caixa de inspeção 01 (entrada 2). O sistema com recirculação do fluido possui mais zonas sendo revolvidas, quando comparado com os resultados do Caso (0), i.e., sem recirculação, Figura 4.7. Além do aumento significativo no gradiente de velocidade.

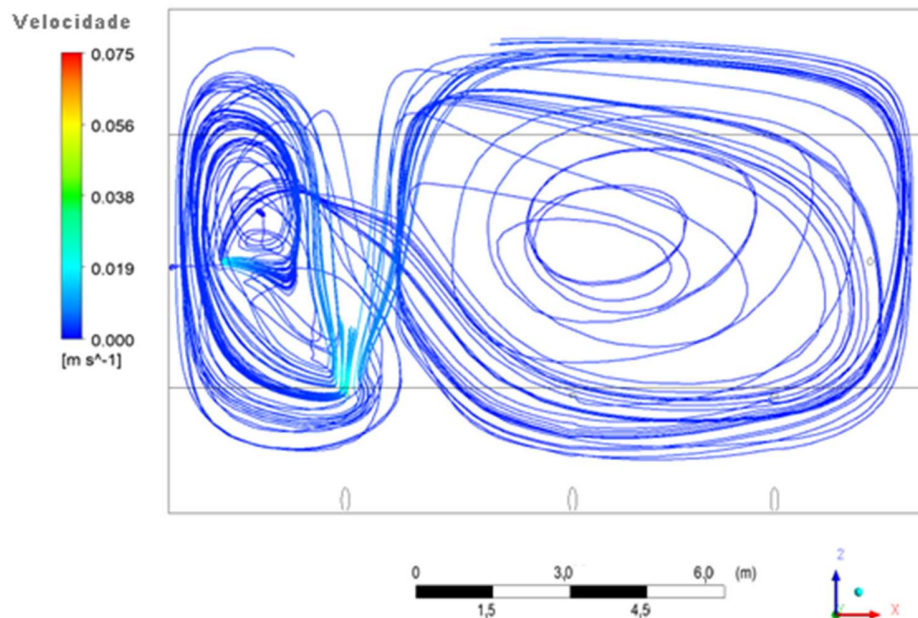


Figura 4.8 – Vista em planta baixa do comportamento das linhas de corrente do escoamento para o Caso (i).

Além do melhor desempenho da recirculação o Caso (i) quando comparado ao Caso (0) comprovou que ao se aquecer a parte do fluido que passa pelo sistema de recirculação/aquecimento à uma temperatura de 40°C é o suficiente para que praticamente todo fluido atinja uma temperatura homogênea, no caso desse estudo cerca de 33°C.

A Figura 4.9 apresenta a distribuição da temperatura do fluido no interior do biodigestor em diferentes profundidades para o Caso (i). A Figura 4.9 (a) apresenta

um plano com a distribuição da temperatura no topo do biodigestor, pode-se observar que a temperatura é predominante uniforme.

Já as Figura 4.9 (b) e (c) mostram planos a profundidade de 1,66 m e 2,0 m, respectivamente. A profundidade de 1,66 m foi escolhida pois é a partir dessa altura que o tubo da caixa de inspeção entra em contato com o fluido no interior do reator. Na Figura 4.9 (b) a temperatura de saída do sistema de recirculação, a partir do tubo 1 da caixa de inspeção, é de cerca de 40 °C e também, a temperatura próxima à entrada do biodigestor cerca de 27 °C, tais zonas trocam calor das entradas do sistema de aquecimento e do biodigestor, respectivamente.

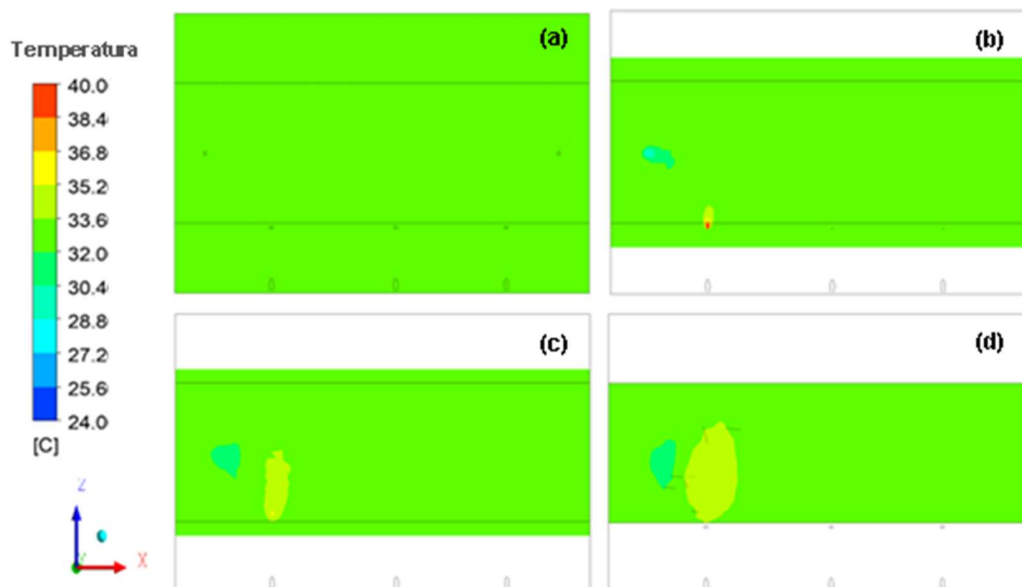


Figura 4.9 – Distribuição da temperatura do substrato em diferentes profundidades do biodigestor para o Caso (i) (a) no topo do biodigestor, (b) a 1,66 m de profundidade, (c) a 2,00 m de profundidade e (d) na base do biodigestor.

Já pela Figura 4.9 (c) percebe-se que a mistura do fluido/substrato se tornou mais homogênea com pequenas zonas de temperaturas intermediárias, 37 °C. Por fim a Figura 4.9 (d) apresenta a distribuição da temperatura na base do biodigestor, nessa imagem as zonas de temperaturas intermediárias são maiores. Pode-se observar que há uma zona maior com temperatura em torno de 35°C e outra menor em torno de 27°C, o que indica que esses volumes de substrato mais próximas as

entradas de tubo de inspeção e do biodigestor são favorecidas e desfavorecidas, respectivamente. Isso pode indicar que é necessária uma recirculação mais acentuada, para ser possível homogeneizar também essas zonas.

A Figura 4.10 apresenta o comportamento da temperatura do interior do biodigestor, da vista em corte transversal posicionada ao longo do eixo x, em 3,0 m e em corte longitudinal posicionada no centro do eixo z, 5,0 m, respectivamente, para o Caso (i).

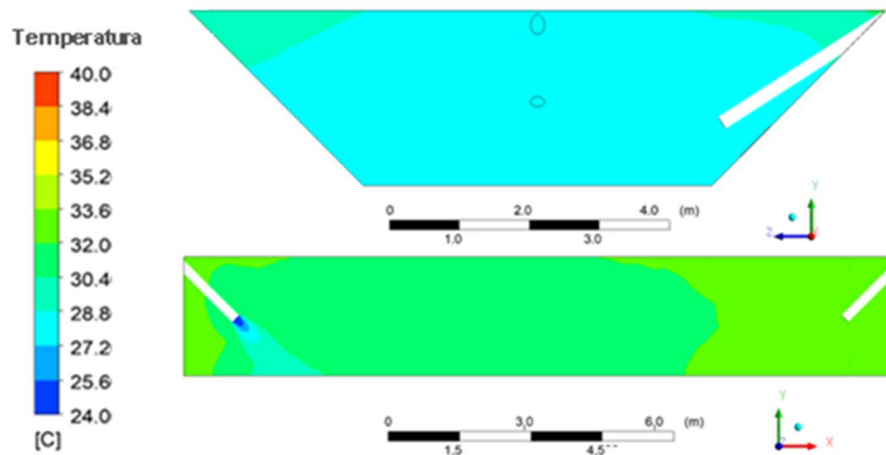


Figura 4.10 – Comportamento da temperatura no interior do biodigestor, de vistas em corte transversal e corte longitudinal, para o Caso (i).

Pode-se observar pela vista em corte transversal da Figura 4.10, que esta zona não recebe uma quantidade de calor significativo do sistema de aquecimento, com temperaturas entre cerca de 28 e 32 °C. Como visto na Figura 4.8, esta parte do biodigestor recebe grande influência do escoamento de entrada do biodigestor e pode-se verificar que o sistema de recirculação não consegue homogeneizar todas as temperaturas. Porém, são poucas as zonas com diferenças de temperaturas ao longo do biodigestor, com temperaturas entre cerca de 28 e 37 °C

Por fim foi analisado o Caso (ii). Como neste caso o fluido aquecido a 40 °C entra no sistema de recirculação pelo centro do biodigestor, era esperado que a temperatura se distribuísse de forma mais uniforme por todo o mesmo. E isso

ocorreu como pode-se notar pela Tabela 4.3, onde se tem uma temperatura média um pouco mais alta que no Caso (i).

A Figura 4.11 apresenta a distribuição da temperatura nos pontos ao longo do comprimento do biodigestor (a) 2,0 m; (b) 9,0 m e (c) 12,0 m.

Figura 4.11 (a) apresenta a distribuição da temperatura antes da entrada do fluido a 40 °C (entrada 2) no interior do biodigestor e um pouco depois da entrada do fluido pelo tubo de entrada, a uma temperatura de 24 °C, assim pode se observar uma pequena zona à aproximadamente de 28 °C.

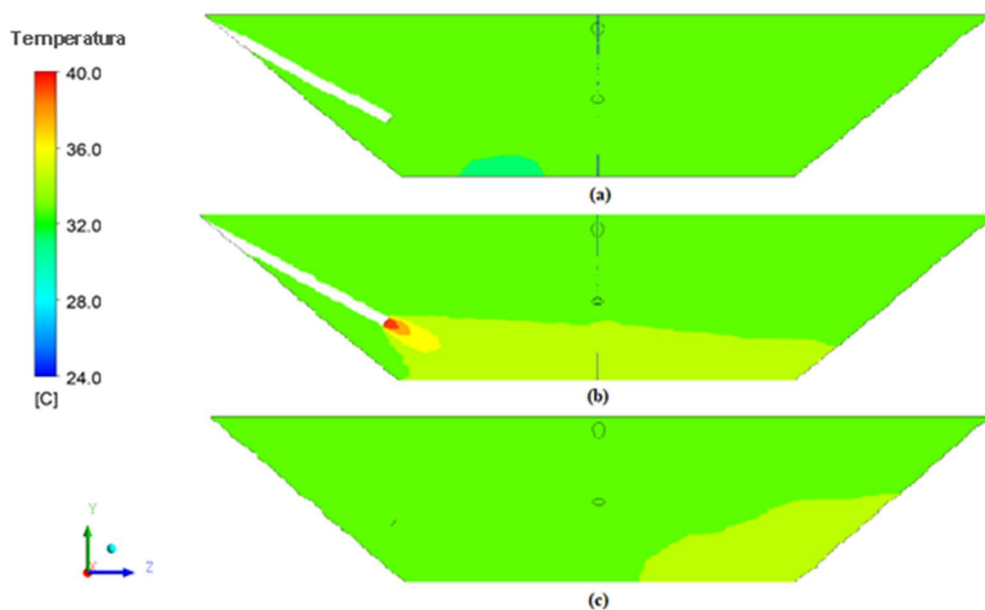


Figura 4.11 - Distribuição da temperatura ao longo do eixo x do biodigestor: (a) a 2,0 m; (b) a 8,0 m e (c) a 10,0 m, para o Caso (ii).

Já a Figura 4.11 (b) mostra a distribuição da temperatura exatamente na seção onde o tubo da entrada do fluido a 40 °C está localizado, pode ser ver como o fluido vai homogeneizando sua temperatura ao longo do biodigestor. Analisando a variação da temperatura ao longo do eixo x, pode se perceber que o sistema de aquecimento/recirculação consegue contribuir para o aumento da temperatura média de todo o biodigestor, em algumas zonas com mais intensidade.

Quanto ao comportamento das linhas de corrente de velocidades no Caso (ii), pode se observar que o gradiente de velocidade diminuiu cerca 12 %. Isso pode ser

explicado pela acentuada divisão as linhas de corrente como mostrado na Figura 4.12. A Figura 4.12 mostra o comportamento das linhas de corrente da velocidade dos fluxos que alimentam o biodigestor, sistema de alimentação e aquecimento/recirculação para o Caso (ii).

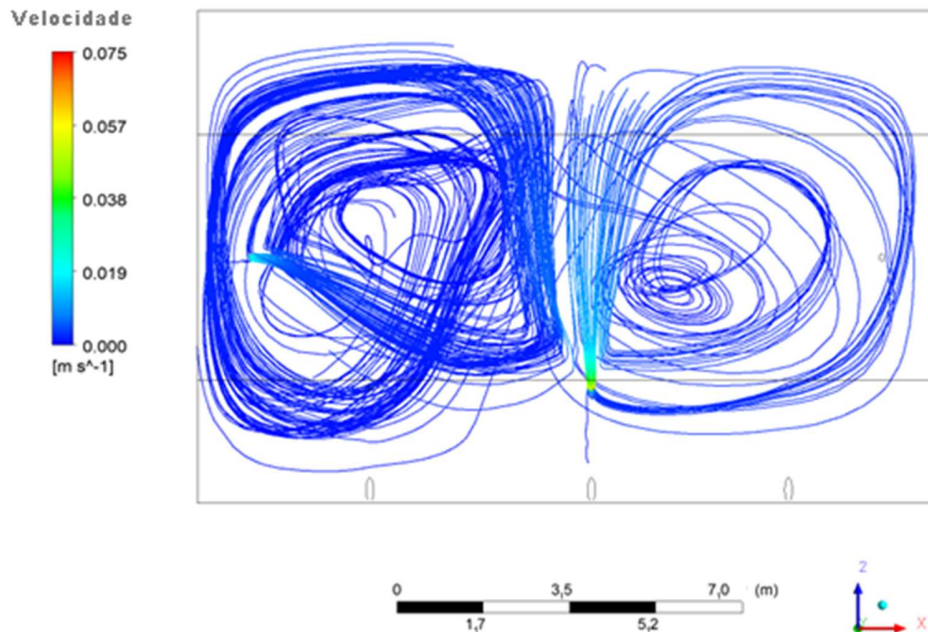


Figura 4.12 - Vista em planta baixa do comportamento das linhas de corrente do escoamento para o Caso (ii).

Na Figura 4.12 é observado que são formados dois vórtices intensos no interior do biodigestor, sendo que o vórtice mais próximo ao tubo de alimentação do biodigestor é mais intenso, isso é pode ser devido a barreira que é formada pelo escoamento do sistema de aquecimento/recirculação no centro do biodigestor. Também há que se considerar, que a velocidade de entrada do biodigestor, 0,026 m/s é menor que a velocidade do sistema de recirculação 0,074 m/s.

Houve a formação de um vórtice maior próximo à entrada do reator, onde há uma maior recirculação, como mostrado na Figura 4.12, por outro lado, o segundo vórtice formado na saída do reator, não alcançou todas as zonas do biodigestor resultando assim numa menor mistura e na presença de zonas mortas nas extremidades do biodigestor. A presença de zonas mortas é de grande preocupação, pois além de implicar em um volume de microrganismos em menor

produtividade, pode causar a sedimentação do substrato levando, em alguns casos, a parada do processo.

O resultado da análise de desvio padrão das temperaturas mostra que a dispersão dos dados está próxima a média amostral, o que indica que a simulação possui estabilidade.

Além do melhor desempenho no revolvimento, o Caso (i) também demonstrou bom comportamento quanto a homogeneidade de temperaturas. Com a análise do sistema de automação pode se comprovar que ao aquecer apenas parte do substrato à temperatura de 40 °C foi o suficiente para que praticamente todo volume de digestato do reator atingisse temperaturas homogêneas, no caso desse estudo cerca de 33 °C. Alcançando a temperatura de 33 °C, pode-se afirmar que o biodigestor pode ter otimizado sua produção de biogás e de material fertilizante.

Foram utilizados como parâmetros de comparação de *design* de biodigestores o gradiente de velocidade absoluta e a razão de velocidade/comprimento (equações 4.6, e a 4.5 respectivamente). Calculando a razão entre a velocidade e o comprimento do biodigestor simulado e do biodigestor modelo oval, com e sem recirculação (Meister *et al.*, 2018) encontraram 7,2. Do mesmo modo foi feito o cálculo entre a razão do gradiente de velocidade absoluta para o modelo simulado e o descrito por Meister *et al.* (2018) e foi encontrado o valor de 7,1.

Pelo fato de serem observados nas simulações coeficientes de velocidades cerca de 60% inferiores aos indicados pela literatura, Meister *et al.* (2018). Bem como da existência de “zonas mortas”, ou seja, de velocidades de escoamento do substrato próximas de zero, recomenda-se que sejam feitas alterações em parâmetros de projeto como por exemplo: aumento das velocidades de entrada de fluido no reservatório e/ou de sucção e recalque para se atender as indicações da literatura.

Assim não se critica a metodologia, mas os parâmetros de simulação.

Outra possibilidade é de mudança do tipo de biodigestor, ou seja, do *design* em si.

4.5 Conclusão

A dinâmica dos fluidos computacional se mostrou uma ferramenta eficiente e relativamente rápida na execução de testes para análises de comportamentos termodinâmicos. Foram necessárias algumas aproximações, porém são resultados satisfatórios quando comparados aos da literatura. Frisa-se aqui que os resultados apresentados nesta análise são em cada das camadas ou volumes considerados, podendo gerar soluções em três dimensões, o que melhor especifica os resultados em relação a outros tipos de simulação.

O tipo de biodigestor tubular de manta plástica ainda é pouco estudado quando comparado a outros tipos, o que torna o estudo mais interessante no viés da pesquisa para área de sistemas de tratamento dejetos da suinocultura e na geração de energia por fontes renováveis.

A inclusão de sistema de recirculação simultaneamente ao de aquecimento proposto para o biodigestor tubular mostrou-se eficiente quanto ao aquecimento, com temperaturas médias próximas a 33 °C. Já o sistema de recirculação deverá ser simulado para outras velocidades, para se atingir índices recomendados propostos pela literatura.

Portanto, é possível afirmar que o uso do método da dinâmica dos fluidos computacional se mostrou eficiente e eficaz para simular a otimização de biodigestores com e sem sistemas de recirculação e aquecimento.

4.6 Referências Bibliográficas

ANSYS, I. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide** Canonsburg - PA -EUA, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/>. Acesso em: 05 jan. 2019.

ARIF, S.; LIAQUAT, R.; ADIL, M. Applications of materials as additives in anaerobic digestion technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, n. January 2017, p. 354–366, 2018.

BARROS, T. D. **Árvore do Conhecimento: Biodigestor Tubular**. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/>>. Acesso em: 24 jan. 2019.

BRIDGEMAN, J. Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester. **Advances in Engineering Software**, v. 44, n. 6, p. 54–62, 2012.

BRIDGEMAN, J.; JEFFERSON, B.; PARSONS, S. A. The development and application of CFD models for water treatment flocculators. **Advances in Engineering Software**, v. 41, n. 1, p. 99–109, 2010.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. C. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suínica para geração de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 831–844, 2010.

CURRY, N.; PILLAY, P. Integrating solar energy into an urban small-scale anaerobic digester for improved performance. **Renewable Energy**, v. 83, p. 280–293, 2015.

DAPELO, D. *et al.* Towards Lattice-Boltzmann modelling of unconfined gas mixing in anaerobic digestion. **Computers and Fluids**, v. 180, p. 11–21, 2019.

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

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

HULLE, S. W. H. VAN *et al.* Importance of scale and hydrodynamics for modeling anaerobic digester performance. **Chemical Engineering Journal**, v. 255, p. 71–77, 2014.

KARIYAMA, I. D.; ZHAI, X.; WU, B. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review. **Water Research**, v. 143, p. 503–517, 2018.

KINYUA, M. N. *et al.* Use of physical and biological process models to understand the performance of tubular anaerobic digesters. **Biochemical Engineering Journal**, v. 107, p. 35–44, 2016.

LEANDRO, M. T. R.; MARADINI, P. S. **Proposta para regularização ambiental e avaliação do sistema de tratamento de efluentes de suinocultura: um estudo de caso de duas granjas no campus da Universidade Federal de Viçosa**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2018.

LEONZIO, G. Study of mixing systems and geometric configurations for anaerobic digesters using CFD analysis. **Renewable Energy**, v. 123, p. 578–589, 2018.

LIU, Y. *et al.* Investigation on the heat loss characteristic of underground household biogas digester using dynamic simulations and experiments. **Biosystems Engineering**, v. 163, p. 116–133, 2017.

LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A. *et al.* Application of CFD methods to an anaerobic digester: The case of Ontinyent WWTP, Valencia, Spain. **Journal of Water Process Engineering**, v. 7, p. 131–140, 2015.

LOVATO, G. *et al.* Hydrogen production by co-digesting cheese whey and glycerin in an AnSBBR: Temperature effect. **Biochemical Engineering Journal**, v. 138, p. 81–90, 2018.

MEISTER, M. *et al.* Mixing non-Newtonian flows in anaerobic digesters by impellers and pumped recirculation. **Advances in Engineering Software**, v. 115, n. October 2017, p. 194–203, 2018.

MOHAMMADREZAEI, R.; ZAREEI, S.; KHAZAEI, N. B.-. Optimum mixing rate in biogas reactors : Energy balance calculations and computational fluid dynamics simulation. **Energy**, v. 159, p. 54–60, 2018.

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

RASOULI, M. *et al.* CFD simulation of fluid flow in a novel prototype radial mixed plug-flow reactor. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 64, p. 124–133,

ago. 2018.

SAJJADI, B. *et al.* Fluid dynamic analysis of non-Newtonian flow behavior of municipal sludge simulant in anaerobic digesters using submerged , recirculating jets. **Chemical Engineering Journal**, v. 298, p. 259–270, 2016.

SINDALL, R.; BRIDGEMAN, J.; CARLIELL-MARQUET, C. Velocity gradient as a tool to characterise the link between mixing and biogas production in anaerobic waste digesters. **Water Science and Technology**, v. 67, n. 12, p. 2800–2806, 2013.

WANG, J. *et al.* A review on CFD simulating method for biogas fermentation material fluid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, n. August, p. 64–73, 2018.

WU, B. CFD investigation of turbulence models for mechanical agitation of non-Newtonian fluids in anaerobic digesters. **Water Research**, v. 45, n. 5, p. 2082–2094, 2011.

WU, B. Advances in the use of CFD to characterize, design and optimize bioenergy systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 93, p. 195–208, 2013.

Capítulo 5: Conclusão Geral

A pesquisa realizada e os resultados obtidos confirmaram que o emprego de biodigestores para minimizar impactos ambientais e fonte de energia vem sendo alvo de pesquisa e desenvolvimento no mundo todo. Tomar conhecimento das variáveis envolvidas na biodigestão anaeróbia e das tecnologias envolvendo este processo é o primeiro passo para a otimização do *design* e da operação de digestores anaeróbios.

Notou-se que são poucos os estudos referentes ao modelo tubular com manta plástica aplicado nas suinoculturas do Brasil e menos ainda trabalhos que abordem tecnologias para otimizar a produção de biogás deste modelo. Isto pode ser melhorado com proposição de políticas públicas visando maiores investimentos na produção do biogás e também em incentivos de pesquisas para a evolução dessa tecnologia no Brasil. Neste contexto, o presente trabalho pode ser destacado por abordar parâmetros e tecnologias do modelo canadense, propondo melhorias do *design* e de duas estratégias de automação.

Muitos estudos estão sendo realizados afim de tornar mais eficiente a produção de biogás, tanto por meio de simulações computacionais, quanto pelo desenvolvimento de protótipos e plantas industriais para a implementação de sistemas de controle a automação otimizados. O *software* Energy Plus se mostrou adequado para análises de trocas térmicas em biodigestores. A modelagem do comportamento térmico do solo no entorno realizada foi um diferencial. O erro relativo médio foi de 2,91 % simulado da temperatura do solo em relação a dados experimentais. Porém, sabe-se que da limitação do *software* Energy Plus quanto a não modelagem de reações bioquímicas e químicas do substrato que afetam o balanço de energia.

Com a modelagem realizada em CFD foi possível comparar um biodigestor com e sem sistema de recirculação/aquecimento. Comprovou-se que o sistema proposto de recirculação/aquecimento possui potencial de maior produção de biogás, uma vez que as variáveis analisadas, temperatura e mistura, estão em concordância com resultados da literatura.

Sugestão de Trabalhos Futuros

Sugere-se como trabalhos futuros aprimorar a modelagem realizada em ambos os *softwares*. No *software* Energy Plus deve se realizar simulações para períodos de todas as estações do ano.

Podem ser implementadas na modelagem no *software* CFX diversas novas características: (i) considerar o fluido de simulação como multifásico; e (ii) considerar as concentrações de sólidos totais da biomassa a ser estudado. Lembrando que alguns tipos de resíduos possuem alta concentração de sólidos; (iii) analisar as trocas térmicas entres o substrato e o biogás bem como a liberação e consumo de energia devido as reações químicas e bioquímicas dos microrganismos; e (iv) realizar simulações em regime transiente especialmente para se avaliar o tempo necessário para alcançar o regime permanente.

Realizar simulações integrando ambos os *softwares* utilizados na pesquisa, Energy Plus e CFX.

Simular o balanço de energia e de exergia de biodigestores com e sem sistemas de recirculação e do aquecimento, automatizados ou não, desde os recursos naturais até os usos finais de envolvidos.

Simular e implementar em escalas laboratorial, piloto e industrial biodigestor com sistema automático de controle de recirculação e aquecimento.