

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAMPUS LONDRINA

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VINICIUS ALEXANDRE DE ALMEIDA CRUZ

**CODIGESTÃO DE LODO DE LATICÍNIOS E LEITE DE DESCARTE
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOGÁS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

VINICIUS ALEXANDRE DE ALMEIDA CRUZ

**CODIGESTÃO DE LODO DE LATICÍNIOS E LEITE DE DESCARTE
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOGÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi

LONDRINA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Codigestão de lodo de laticínios e leite de descarte para geração de energia com biogás

por

Vinicius Alexandre de Almeida Cruz

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 28 de novembro de 2019 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Dr. Aulus Roberto Romão Binelli
(UTFPR)

Prof. Ms. Ana Paula Cosso Silva Araujo
(UTFPR)

Profa. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi
(UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço minha mãe Cintia Aparecida de Almeida e meu pai Alexandre Pereira da Cruz por terem sempre me incentivado a estudar, em alcançar meus objetivos e também por todo apoio durante os anos de graduação. Agradeço a Deus por toda saúde e proteção em minha vida, tornando tudo possível até aqui.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina pela estrutura fornecida, possibilitando assim a realização desta pesquisa.

Ao meu orientar Dr. Ricardo Nagamine Costanzi, que desde o começo do projeto estive pensando nos desafios e soluções para realiza-lo. Agradeço também por ter compartilhado comigo o vasto conhecimento e experiências profissionais durante o trabalho e pela disponibilidade no seu tempo vago.

Aos meus amigos de graduação que sempre estiveram presentes nos momentos mais difíceis e me ajudando a superar diversas situações. Agradeço especialmente minha amiga Arlete Alves Pereira por ter me ajudado em todos os momentos, pelo companheirismo, apoio e por acreditar em mim.

Finalizo, agradecendo os professores que contribuíram para a minha formação profissional, cada um com o seu jeito de ser e ensinamentos da vida. E também aos servidores da Universidade que influenciaram na minha formação acadêmica.

RESUMO

CRUZ, V. A. A. **Codigestão de lodo de laticínios e leite de descarte para geração de energia com biogás**. 2019. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Bacharelado em Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial de geração de biogás utilizando resíduos orgânicos gerados em indústria de laticínios: lodo flotado após centrifugação e o leite de descarte. O biogás é gerado na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e mostra-se como uma alternativa sustentável de disposição e tratamento de resíduos gerados nos processos industriais. O estudo da geração de biogás foi realizado em 14 biodigestores de bancada construídos em garrafas pet e seringa de 60 mL para o armazenamento do biogás gerado ao longo do tempo. No ensaio do delineamento experimental as proporções dos resíduos de laticínios em cada biodigestor foram delimitadas pelo método do delineamento composto central rotacional (DCCR) e o inóculo foi adicionado na proporção de 30% do volume ocupado pelos resíduos de laticínios. No ensaio da digestão de lodo e inóculo, os biodigestores foram limitados em 10% de sólidos totais. Os parâmetros analisados foram: pH, sólidos totais, sólidos voláteis e fixos, produção e análise qualitativa do biogás. Além disso, foi analisado o tempo de retorno do investimento em dois sistemas de codigestão que destinam o biogás para queima em caldeira ou geração de eletricidade. Como principais resultados, obteve-se uma produtividade de biogás de 49,62 mL g⁻¹ de sólidos voláteis inseridos no biodigestor 5 e 46,77 mL g⁻¹ de sólidos voláteis no biodigestor 3. Houve o decaimento do pH nos biodigestores devido ao acúmulo de ácidos graxos voláteis, atingindo valores superiores a 6.000 mg L⁻¹, no qual inibiu a atividade biológica a partir do terceiro dia de biodigestão e consequentemente a produção de biogás. A análise do tempo de retorno para o investimento em equipamentos de uma unidade de produção de biogás na codigestão de lodo de laticínios e leite de descarte considerando o PCI do biogás foi inferior ao uso de biomassa do tipo cavaco de eucalipto para queima em caldeira. Porém a análise de geração de energia por meio de moto gerador via biogás apresentou valores de tempo de retorno de 1 ano e 9 meses para o biodigestor com leite de descarte mais inóculo e 1 ano e 3 meses para o biodigestor com lodo, leite de descarte e inóculo.

Palavras-chave: Biogás, resíduos de laticínios, digestão anaeróbia.

ABSTRACT

CRUZ, V. A. A. Dairy sludge and waste milk co-digestion for biogas power generation. 2019. 72 f. Course Completion Paper (Undergraduate). Bachelor of Environmental Engineering. Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2019.

This research aimed to evaluate the potential of biogas generation from the dairy industry waste: floated sludge after centrifugation and discarded milk. Biogas is generated in anaerobic digestion of organic waste and is a sustainable alternative for disposal and treatment of industrial waste process. The study of biogas generation was carried out in 14 bench biodigestors built in pet bottles, and syringes with a volume of 60 mL for the storage of biogas generated over time. In the experimental design the proportions of dairy residues used in each biodigester were determined by the central composite rotational design (CCRD) method. Inoculum was added at a rate of 30% of the total volume of dairy waste. In the sludge and inoculum digestion assay, digesters were limited to 10% total solids. The parameters analyzed were: pH, total solids, volatile and fixed solids, biogas production and qualitative analysis. In addition, the turnaround time in two target coding systems or biogas for boiler burning or electricity generation was analyzed. The main results were a biogas productivity of 49.62 mL g⁻¹ of volatile solids in the biodigester 5 and 46.77 mL g⁻¹ of volatile solids in the biodigester 3. There was a pH decay due to the accumulation of volatile fatty acids, reaching values above than 6000 mg L⁻¹, which inhibited the biological activity from the third day of digestion and consequently the production of biogas. The qualitative analysis of biogas in NaOH solution resulted in an average concentration of 60% of CH₄ contained in the biogas produced. The payback time analysis for equipment investment of a biogas production unit in the co-digestion of dairy sludge and discarded milk considering the biogas PCI was lower than the use of eucalyptus chip, that was a type of biomass for boiler burning. However, the analysis of power generation by biogas motor generator showed return time values of 1 year and 9 months for the biodigester with discarded milk and inoculum; and 1 year and 3 months for the biodigester with sludge, discarded milk and inoculum.

Key-words: Biogas, dairy waste, anaerobic digestion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biodigestor modelo Indiano.....	19
Figura 2 - Biodigestor modelo Chinês	20
Figura 3 - Biodigestor modelo Canadense	21
Figura 4 - Etapas da digestão anaeróbia	23
Figura 5 - Turbina a gás operando em ciclo aberto.....	26
Figura 6 - Biodigestores utilizados	29
Figura 7 - A) lodo anaeróbio, B) lodo de laticínios e C) leite	30
Figura 8 - Sistema de medição do metano.....	32
Figura 9 - Fluxograma das etapas de um sistema de aproveitamento do biogás	37
Figura 10 - Quadro do poder calorífico do biogás com relação ao teor de metano	37
Figura 11 - Biodigestor tanque de polietileno Fortplus	55
Figura 12 - Cilindro suporte das limalhas de ferro.....	55
Figura 13 - Gasômetro de dupla membrana GS	56
Figura 14 - Medidor de vazão Omega.....	56
Figura 15 - Compressor de baixa pressão	57
Figura 16 - Tubo Pex gás 26 mm múltiplas camadas	57
Figura 17 - Quadro das tarifas praticadas ao subgrupo A4 pela COPEL	59
Figura 18 - Moto gerador de 30 Kva.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média do biogás para diferentes resíduos orgânicos	15
Tabela 2 - Equivalência de 1 m ³ de biogás e outros combustíveis	16
Tabela 3 - Valores reais de lodo de laticínios e leite de descarte determinados pelo método DCCR para os biodigestores.....	31
Tabela 4 - Equivalência de 57 m ³ de biogás comparado com fontes usuais.....	38
Tabela 5 - Volume de biogás obtido na biodigestão de lodo de laticínios e inóculo.....	39
Tabela 6 - Equivalência de 78,44m ³ de biogás comparado com fontes usuais.....	39
Tabela 7 - Caracterização dos resíduos que foram utilizados na biodigestão	41
Tabela 8 - Volume total acumulado de biogás	43
Tabela 9 - Volume de biogás produzido por volume de resíduos nos biodigestores.....	45
Tabela 10 - Caracterização do teor de umidade e sólidos no início do experimento.	47
Tabela 11 - Caracterização do teor de umidade e sólidos no final do experimento	48
Tabela 12 - Redução mássica de sólidos voláteis nos biodigestores.....	48
Tabela 13 - pH dos biodigestores e AGV no final do experimento	51
Tabela 14 - Análise de variância (Anova) por regressão aplicada a variável resposta volume de biogás	54
Tabela 15 - Investimento para implantação do sistema de codigestão 1	58
Tabela 16 - Investimento para implantação do sistema de codigestão 2	58
Tabela 17 - Receitas anuais obtidas nos sistemas de codigestão	59
Tabela 18 - Tempo de retorno do investimento em equipamentos	60
Tabela 19 - Valores de PCI do biogás e cavaco	60
Tabela 20 - Tempo de retorno do investimento comparado ao cavaco.....	61
Tabela 21 - Tempo de retorno do investimento comparado a tarifação de energia da COPEL.....	62

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 Indústrias de laticínios e a produção de leite	13
3.2 Biogás.....	14
3.3 Biodigestores.....	16
3.3.1 Modelo Indiano.....	18
3.3.2 Modelo Chinês	19
3.3.3 Modelo Canadense	20
3.4 Digestão anaeróbia	21
3.5 Conversão do biogás em energia	25
3.5.1 Turbina a gás	25
3.5.2 Microturbinas a gás	27
3.5.3 Motores de combustão interna.....	27
3.5.4 Combustão em caldeiras.....	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 Biodigestores.....	29
4.2 Delineamento experimental	30
4.3 Análise qualitativa do biogás	32
4.4 Análises físico-químicas.....	33
4.4.1 pH e condutividade elétrica	34
4.4.2 Série de sólidos.....	34
4.4.3 Ácidos graxos voláteis.....	35
4.5 Digestão de lodo de laticínios e inóculo	36
4.6 Análise preliminar da viabilidade de geração de energia	36
4.6.1 Sistema de codigestão 1	38

4.6.2 Sistema de codigestão 2	39
4.6.3 Período de retorno do investimento	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Caracterização físico-química dos resíduos orgânicos.....	41
5.2 Produção de biogás	42
5.3 Teor de umidade e sólidos	47
5.4 pH e ácidos graxos voláteis	51
5.5 Qualidade do biogás	52
5.6 Digestão de lodo e inóculo.....	52
5.7 Gráfico de superfície.....	53
5.8 Análise preliminar da viabilidade.....	54
6. CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial aumentou significativamente a demanda por alimentos, intensificando as alterações sobre o meio ambiente, pois a indústria de alimentos é caracterizada por produzir subprodutos com alto índice de carga orgânica facilmente biodegradável que podem causar impactos ambientais de grande monta quando descartados de forma inadequada (CHENG, 2007).

Dentre este setor, a indústria de laticínios destaca-se quanto ao seu potencial poluidor. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO, 2019), o Brasil é um dos maiores produtores de leite do mundo, ocupando a 5ª posição no ranking mundial. O país produziu em 2018 aproximadamente 35,54 bilhões de litros, representando 4,22% da produção mundial.

A indústria de laticínios gera efluentes líquidos, emissões atmosféricas e resíduos sólidos provenientes de seu processo industrial. Villa *et al.* (2007) estima que para cada litro de leite beneficiado sejam produzidos 2,5 L de efluente. Os efluentes líquidos são originados principalmente devido ao processo de limpeza e lavagem dos equipamentos; as emissões atmosféricas originam-se principalmente da queima de combustível para a geração de vapor em caldeiras e os resíduos sólidos são originados nas atividades administrativas e industriais, sendo os resíduos gerados nos sistemas de tratamento de efluentes, principalmente, sobrenadantes da flotação e lodo biológico (FEAM e FIEMG, 2014).

Assim, o gerenciamento e tratamento adequado dos efluentes e resíduos sólidos gerados é de fundamental importância antes do lançamento em corpo receptor ou disposição no meio ambiente (NIRENBERG e FERREIRA, 2005).

Outro fator relevante das indústrias de laticínios é que podem ser caracterizadas como grandes consumidores de energia. Neste contexto, a digestão anaeróbia surge como uma alternativa importante para recuperar a energia contida nos resíduos pela possibilidade da geração de biogás.

A digestão anaeróbia ocorre em ambientes nos quais não existe a presença de oxigênio e tem sido utilizada como forma de tratamento de resíduos orgânicos associada à produção de biogás. O processo consiste na degradação do material orgânico por meio

de bactérias em quatro etapas de reações bioquímicas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O sucesso no processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica, dependerá da simbiose entre as bactérias fermentativas e metanogênicas (LORA e VENTURINI, 2012).

O biogás é constituído por diversos gases, onde o metano e o dióxido de carbono apresentam-se em maiores quantidades. O potencial energético do biogás depende da quantidade de metano presente, devido ao seu poder calorífico (SALOMON e LORA, 2005).

Silva (2015) obteve uma relação de produção de 5,5 L de metano para cada Kg de resíduo de leite inoculado. Em simulação obtida para as indústrias de laticínios no estado de Sergipe, Santos (2015) obteve valores de produção de metano na faixa de 900 a 6.600 m³ em 28 dias, com potencial de geração de energia de 10.000 a 73.000 KWh.

O biogás é uma fonte renovável de energia e pode ser utilizado tanto para o suprimento de energia elétrica como na produção de calor. Além disso, a implantação de uma usina de biogás, pode configurar uma alternativa sustentável, visto que fecha o ciclo de produção e consumo, promovendo o retorno dos resíduos e efluentes para a cadeia produtiva (FEAM; FIEMG; GIZ, 2015).

Desta forma, este trabalho teve como tema conceitual a necessidade e obrigatoriedade de tratamento dos resíduos orgânicos das indústrias de laticínios visando obter energia para aproveitamento nos processos industriais por meio da produção de biogás e do seu uso potencial em várias vias tecnológicas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a produção de biogás em escala reduzida de bancada laboratorial a partir de substrato proveniente de uma indústria de laticínios: lodo resultante do processo de flotação por ar dissolvido (FAD) e leite proveniente de descarte.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Verificar a variação de pH no processo de digestão anaeróbia;
- Discutir as inferências dos ácidos graxos voláteis ao final do experimento;
- Quantificar a produção de metano nos biodigestores de bancada;
- Definir um modelo matemático com a utilização do método do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) que represente a produção de biogás;
- Analisar a viabilidade econômica de dois sistemas de codigestão em diferentes vias de conversão do biogás.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Indústrias de laticínios e a produção de leite

O setor agroindustrial e a indústria de laticínios podem ser definidos como a junção de atividades que tem por objetivo o processamento de um único insumo, o leite, que possibilita a origem de diversos produtos de acordo com a tecnologia envolvida no processo, permitindo a elaboração de queijos, manteiga, creme, leite em pó, iogurtes, doces e outros derivados (VENTURINI; SARCINELLI; SILVA, 2007; HENARES, 2015).

Segundo Jank *et al.* (1999) na década de 90, ocorreu uma mudança estrutural na indústria brasileira de laticínios, como a desregulamentação do mercado de leite, abertura comercial para o exterior e consolidação da economia, que implicaram no impulsionamento do setor. A produção nacional de leite vem passando por expressivos aumentos a partir desse período. Com a considerável modernização tecnológica do setor, de 2002 a 2012 o crescimento foi na ordem de 10,7 bilhões de litros, resultado paralelo ao crescimento da produtividade das vacas ordenhadas em 2,1% ao ano (RESENDE e STOCK, 2014).

De acordo com a FAO (2019), em 2018 a produção mundial de leite foi estimada em 843 bilhões de litros, com um aumento de 2,2% em relação ao ano de 2017, sendo o continente Asiático o maior produtor (41%) seguido da Europa (26,9%) e América do Norte (12,9%). A produção de leite na América do Sul foi de 64,4 bilhões, um aumento de 1,6% comparado a 2017, destacando-se Argentina, Brasil, Chile, Uruguai e Colômbia como os maiores produtores. O Brasil ocupa a 5ª posição no ranking mundial e produziu em 2018 aproximadamente 35,54 bilhões de litros. Isso representou um crescimento moderado de 0,8% em relação a 4% no ano de 2017 (FAO, 2019).

Grandes indústrias de processamento de leite estão instaladas no Brasil. Segundo o ranking brasileiro das maiores indústrias de laticínios de 2017, de acordo com a quantidade de leite adquirida, a NESTLE, Laticínios Bela Vista e UNIUM (Intercooperação de Lácteos das Cooperativas Frisia, Castrolanda e Capal), são classificadas como as três maiores indústrias do território nacional, respectivamente, totalizando aproximadamente 3,75 bilhões de litros recepcionados (LEITE BRASIL, 2017).

Em todas as etapas do processo produtivo deste seguimento são gerados aspectos ambientais, como a geração de efluentes líquidos, resíduos sólidos e as emissões atmosféricas, que devem ser controlados e mitigados em virtude do seu potencial poluidor e dos possíveis impactos ao meio ambiente (FEAM e FIEMG, 2014).

Os efluentes líquidos gerados são os resíduos originados do processamento do leite e seus derivados. Esses efluentes são constituídos principalmente de leite diluído, materiais sólidos flutuantes, detergentes, lubrificantes, desinfetantes, areia, açúcar, pedaços de frutas (no caso da produção de iogurte), essências e condimentos diversos (no caso da produção de queijos e manteiga), que são diluídos no processo de lavagem dos equipamentos, tubulações, pisos e demais instalações da indústria (MACHADO *et al.*, 2002; FONTANELLE, 2006).

O alto consumo de água na indústria de laticínios segundo Maganha (2008), está relacionado à garantia de manutenção das condições sanitárias e de higiene, como a limpeza das instalações, lavagem da massa láctea, produção e resfriamento do vapor. A demanda por água nesses processos é elevada: 1 litro de leite processado pode gerar até 11 litros de efluentes, aproximadamente, o que resulta em grandes volumes a serem gerenciados (BRIAO, 2000; MARKOU e GEORGAKAKIS, 2011).

Os efluentes provenientes da indústria de laticínios são caracterizados pela elevada carga orgânica, concentrações relevantes de nitrogênio e fósforo, sais minerais e sólidos suspensos, tais como lactose, gordura e proteínas (MARKOU e GEORGAKAKIS, 2011). Quando não tratados adequadamente, os efluentes podem influenciar na qualidade das águas e no ecossistema do corpo receptor (POKRYWIECKI, 2013).

3.2 Biogás

O Biogás é um gás gerado no processo de decomposição da matéria orgânica. É o produto final da fermentação anaeróbia de diversos resíduos orgânicos, como dejetos de animais, lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes, resíduos agrícolas e domiciliar. É constituído principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), além de outros gases em menores quantidades, como o gás sulfídrico

(H₂S), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂), hidrogênio (H₂) e amônia (NH₃), sendo variável as proporções desses constituintes de acordo com os tipos de reatores e resíduos tratados no processo (CASSINI, 2003). A Tabela 1 ilustra a composição média do biogás gerado com a utilização de diferentes resíduos orgânicos.

Tabela 1 - Composição média do biogás para diferentes resíduos orgânicos

Composição	Porcentagem (%)
Metano (CH ₄)	55-75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25-45
Nitrogênio (N ₂)	0-3
Hidrogênio (H ₂)	0-2
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0-1

FONTE: Nogueira (1986)

O uso do biogás possibilitou grandes avanços nas indústrias e seu valor comercial aumentou significativamente. Abatzoglou e Boivin (2008) afirmam que isso ocorreu devido ao elevado valor energético do biogás, favorecendo a sua exploração, a geração de receitas e redução de custos relativos ao consumo de energia. Além, da contribuição desse gás no efeito estufa.

A agroindústria é um setor que vem expandindo o uso do biogás nas suas atividades. A utilização deste para a geração de energia elétrica vem se mostrando como uma alternativa de sustentabilidade muito interessante, visto que também é uma forma de disposição e tratamento dos resíduos sólidos e efluentes líquidos gerados (LORA & VENTURINI, 2012; ABREU *et al.*, 2014).

Segundo Cassini (2003), nas diversas aplicações do biogás, a eficiência do processo está diretamente relacionada com o teor de metano presente, uma vez que este é o gás combustível de maior poder calorífico. O poder calorífico inferior (PCI) do biogás varia de 5.000 a 7.000 kcal m⁻³. Quando eliminado completamente o gás carbônico da mistura, o PCI pode atingir valores de até 12.000 kcal m⁻³ (DEGANUTI *et al.*, 2002). Deste modo, a equivalência energética do biogás em relação aos outros combustíveis, leva em consideração o poder calorífico e a eficiência média de combustão (ARAUJO, 2017). A Tabela 2 mostra a relação de equivalência energética do biogás quando comparado com outros combustíveis usuais.

Tabela 2 - Equivalência de 1 m³ de biogás e outros combustíveis

Combustível	Equivalência
Gasolina (L)	0,61
Querosene (L)	0,62
Óleo Diesel (L)	0,55
Gás Liquefeito de Petróleo - GLP (L)	1,43
Etanol (L)	0,8
Carvão Mineral (Kg)	0,74
Lenha (kg)	3,5
Eletricidade (KWh)	1,43

FONTE: Adaptado de Nogueira (1986) e Deganutti *et al.* (2002)

Impurezas presentes no biogás, como a água, ácido sulfídrico e outros componentes químicos, podem influenciar no processo, pois diminuem o poder calorífico do gás em questão (RORATTO, 2014). Visto a influência que as impurezas podem promover ao biogás, o ácido sulfídrico é um dos componentes que deve ser removido, pois confere ao biogás características corrosivas. Assim, todo o sistema pode ficar danificado devido à corrosão no compressor, tanques de armazenamento e nos motores em geral (WELLINGER *et al.*, 1999). Além disso, durante a combustão do biogás, o ácido sulfídrico é convertido em dióxido de enxofre, acarretando em danos ao meio ambiente (SALOMON, 2007).

Existem diversas técnicas para a remoção do ácido sulfídrico do biogás. Este pode ser removido com a utilização de limalhas de ferro, em virtude da formação de sulfeto a partir da reação do ácido com o óxido de ferro. A aplicação desta técnica é simples e de baixo custo e possibilita a remoção completa do ácido sulfídrico presente no biogás (BEDUSCHI; ORTOLANI; COAN, 1985).

3.3 Biodigestores

O Biodigestor é caracterizado pelo local onde ocorre a decomposição anaeróbia dos resíduos, podendo ser uma vala revestida, um tanque ou um recipiente, tendo como atributo a sua simplicidade (BARRERA, 1993; OLIVER *et al.*, 2008). O sistema é vedado, não permitindo a entrada de oxigênio, tornando o meio anaeróbio no qual oferece condições adequadas para que as bactérias promovam a estabilização da matéria

orgânica dos resíduos, gerando o biogás como principal produto e o biofertilizante como subproduto, dependendo do resíduo utilizado.

Os componentes básicos de um biodigestor são a câmara de digestão e o gasômetro. Os resíduos entram na câmara de fermentação, local onde ocorre a degradação anaeróbia da matéria orgânica, posteriormente, os gases são coletados e ficam acumulados no gasômetro (GASPAR, 2003).

De acordo com a alimentação do biodigestor, este pode ser classificado em: biodigestor do tipo contínuo ou em batelada.

Os biodigestores de alimentação contínua se caracterizam pela entrada de matéria orgânica constante. Geralmente são construídos abaixo do nível do solo e possuem duas canalizações, uma de entrada, por onde entra o material a ser degradado e outra de saída, onde sai do sistema o subproduto gerado (FERRAZ e MARRIEL, 1980). A vantagem desse tipo de biodigestor é a produção contínua de biogás e como desvantagem está a limitação do uso de alguns resíduos, como os triturados e dejetos, pois resíduos grosseiros podem entupir as tubulações (RORATTO, 2014).

Nos biodigestores do tipo batelada, toda a carga orgânica permanece no biodigestor em um processo unitário com início e fim, até a conclusão da degradação da matéria orgânica pelas bactérias anaeróbias (FERRAZ e MARRIEL, 1980). A vantagem desse sistema está relacionada com a facilidade do processo de limpeza, uma vez que o reator é esvaziado ao final de cada processo. Entretanto, com a realização da limpeza do sistema as bactérias são removidas totalmente ou parcialmente, tendo a necessidade de se promover uma nova inoculação na próxima carga, reduzindo assim a sua eficiência (RORATTO, 2014).

Na escolha do melhor biodigestor para determinado resíduo, é importante conhecer os princípios de operação dos biodigestores, para que dessa maneira seja realizada a escolha e planejamento do modelo de tratamento do resíduo. Existem três parâmetros básicos que são importantes: o tempo de retenção de microrganismos (TRM), tempo de retenção hidráulica (TRH) e tempo de retenção de sólidos (TRS) (FUKAYAMA, 2008). Além disso, a produção do biogás e a influência/identificação dos microrganismos no processo é de suma importância.

3.3.1 Modelo Indiano

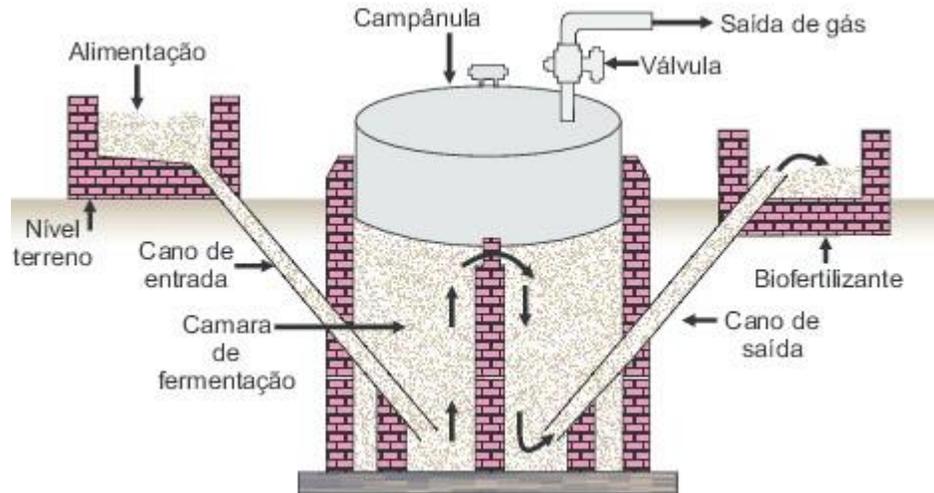
O modelo Indiano é caracterizado por possuir uma campânula que serve como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou em um selo de água externo, evitando que durante o processo não ocorra perdas do gás. Além disso, o biodigestor conta com uma parede central que atua como uma divisória, possibilitando a recirculação interna do material na câmara de fermentação (DEGANUTTI *et al.*, 2002)

Segundo Deganutti *et al.* (2002) a pressão de operação do modelo Indiano é constante conforme o gás é produzido, o gasômetro desloca-se verticalmente devido a pressão, dessa maneira, a pressão interna do biodigestor mantém-se constante.

A construção do modelo é simples e pode ser construído acima do nível do solo, desde que não ocorra dificuldades na alimentação do biodigestor. Como o material do gasômetro é, geralmente, em metal, o custo final pode ser mais oneroso. A distância da fonte do resíduo pode encarecer os custos com o transporte, tornando a utilização deste modelo de biodigestor inviável (PECORA, 2006).

A concentração de sólidos totais (ST) dos resíduos que alimentam o biodigestor modelo Indiano não deve ser superior a 8%, para que não ocorra o entupimento das tubulações de entrada e saída do biodigestor. O modelo Indiano é operado de maneira contínua, normalmente é alimentado por dejetos de bovinos ou suínos (DEGANUTTI *et al.*, 2002). A Figura 1 ilustra os principais componentes de um biodigestor Indiano.

Figura 1 - Biodigestor modelo Indiano



FONTE: Cassini et al. (2014)

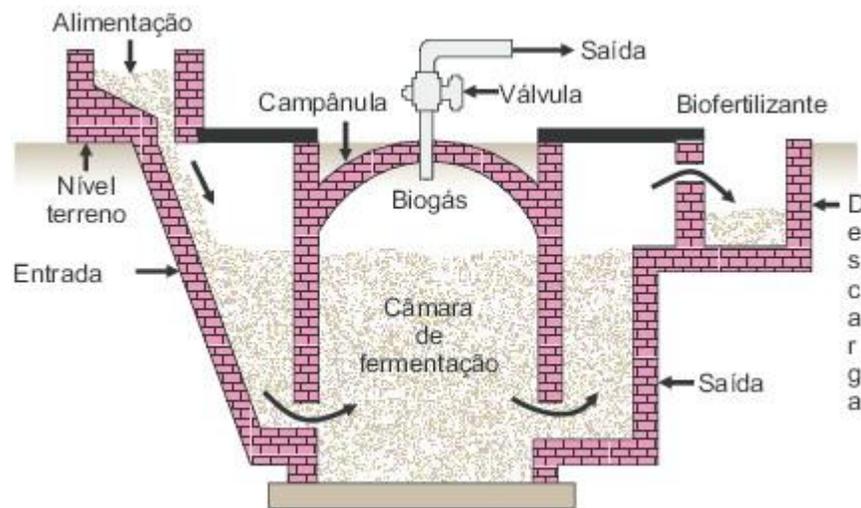
3.3.2 Modelo Chinês

O modelo Chinês é constituído por uma câmara cilíndrica em alvenaria, com teto oval e impermeável, onde ocorre o armazenamento dos gases. O funcionamento desse biodigestor consiste no princípio da prensa hidráulica, de modo que, o aumento da pressão resultante da produção de biogás na câmara, resultará no deslocamento do efluente para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre a descompressão (JORGE & OMENA, 2012). Por não utilizar chapa de aço como gasômetro e ser construído em alvenaria, o custo pode ser reduzido. Usualmente este modelo de sistema é construído abaixo do nível do terreno, por isso as paredes devem ser bem vedadas e impermeabilizadas para evitar o vazamento dos gases e infiltrações de água proveniente do solo em períodos chuvosos ou de lençóis freáticos próximos (DEGANUTTI *et al.*, 2002; GASPAR, 2003).

Na construção do biodigestor modelo Chinês, encontra-se dificuldade na técnica utilizada, devido a sua forma (oval) e por ser construído em alvenaria, necessitando-se de mão de obra qualificada, pois utiliza-se uma técnica em que o próprio peso do tijolo deve mantê-lo na correta posição até que a argamassa seque (GASPAR, 2003).

Este tipo de sistema não é utilizado em grandes instalações, devido a regularização da pressão interna do biodigestor com a liberação de uma parcela do biogás para a atmosfera (VELOSO *et al.*, 2010). Semelhante ao biodigestor modelo Indiano, a alimentação deve ser realizada de maneira contínua, onde os resíduos devem conter uma concentração de sólidos totais entorno de 8% (DEGANUTTI *et al.*, 2002). A Figura 2 ilustra os principais componentes de um biodigestor Chinês.

Figura 2 - Biodigestor modelo Chinês



FONTE: Cassini et al. (2014)

3.3.3 Modelo Canadense

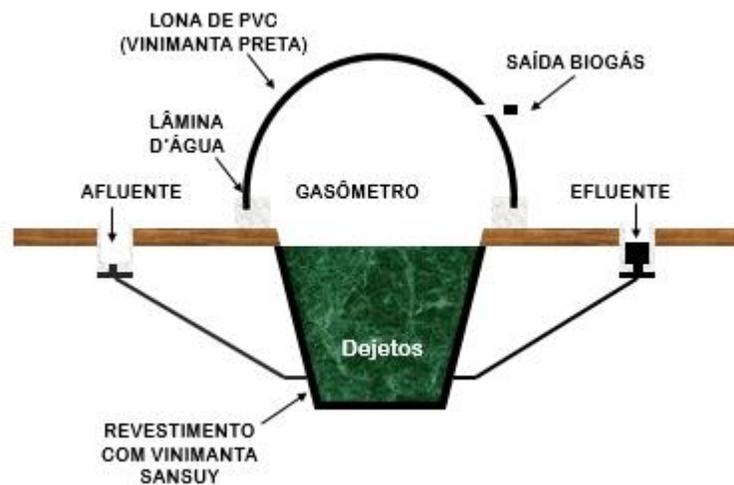
O modelo canadense é um biodigestor do tipo horizontal construído em formato de uma caixa feita em alvenaria e com a largura maior que a profundidade. Deste modo, o biodigestor irá possuir uma maior área de exposição ao sol, o que favorece o aumento da temperatura em seu interior, produzindo maiores quantidades de biogás (CASTANHO e ARRUDA, 2008).

O gasômetro é constituído por uma manta rígida de PVC, conforme o biogás é produzido, a manta infla, possibilitando que o biogás gerado seja armazenado no biodigestor. O local da instalação do biodigestor canadense deve ser seguro, visto que na manta podem ocorrer furos, proporcionando o vazamento do biogás. Além disso, fazem parte desse modelo, uma caixa para a saída do efluente, um registro para a saída

do biogás e um queimador conectado a esse registro de saída do biogás (PEREIRA *et al.*, 2009).

A vedação do biodigestor é feita por uma lâmina de água em que a manta for imersa. O biodigestor pode ser operado com alimentação contínua ou em batelada (JUNIOR, 2008; OLIVER *et al.*, 2008). Este tipo de biodigestor é o mais utilizado no Brasil, devido às vantagens, como a utilização de pequenas ou grandes áreas e projetos agroindustriais. Além disso, a operação de limpeza do sistema é simples, isto devido à facilidade de remoção da manta de PVC. A principal desvantagem é o alto custo da manta geotêxtil, utilizada como gasômetro (OLIVER *et al.*, 2008; RORATTO, 2014). A Figura 3 ilustra os principais componentes de um biodigestor Canadense.

Figura 3 - Biodigestor modelo Canadense



FONTE: Oliver et al. (2008)

3.4 Digestão anaeróbia

Na produção do biogás, o substrato passa por um processo biológico em condições anaeróbias, no qual vários microrganismos interagem em conjunto para a transformação de compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em outros produtos mais simples, como o metano, dióxido de carbono, amônia, ácidos orgânicos de baixo peso molecular e traços de outros gases (CHERNICHARO, 1997; FORESTI *et al.*, 1999).

Os grupos de microrganismos que participam da digestão anaeróbia atuam em simbiose, os produtos de cada fase da digestão são utilizados na fase posterior. As reações bioquímicas que acontecem no processo podem ser divididas em 4 fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHERNICARO, 1997).

A hidrólise é a fase inicial do processo de digestão anaeróbia, nela as substâncias mais complexas, carboidratos, lipídios e proteínas (polímeros), sofrem hidrólise e são transformadas em substâncias mais simples, açúcares, ácidos graxos e aminoácidos (monômeros), para a assimilação pelos microrganismos (MAYER *et al.*, 2013). A etapa de degradação hidrolítica dos polímeros pode ser mais lenta que as demais, por isso esta etapa pode limitar a digestão anaeróbia (LEMA, 1997).

Na acidogênese, ocorre a formação de compostos ácidos pelos microrganismos acidogênicos com a degradação dos monômeros, açúcares solúveis e aminoácidos, em compostos intermediários simples, como o propionato, butirato e ácidos acéticos (MU *et al.*, 2006; CHEONG *et al.*, 2007 apud CVETKOVSKI e LITONJUA, 2012).

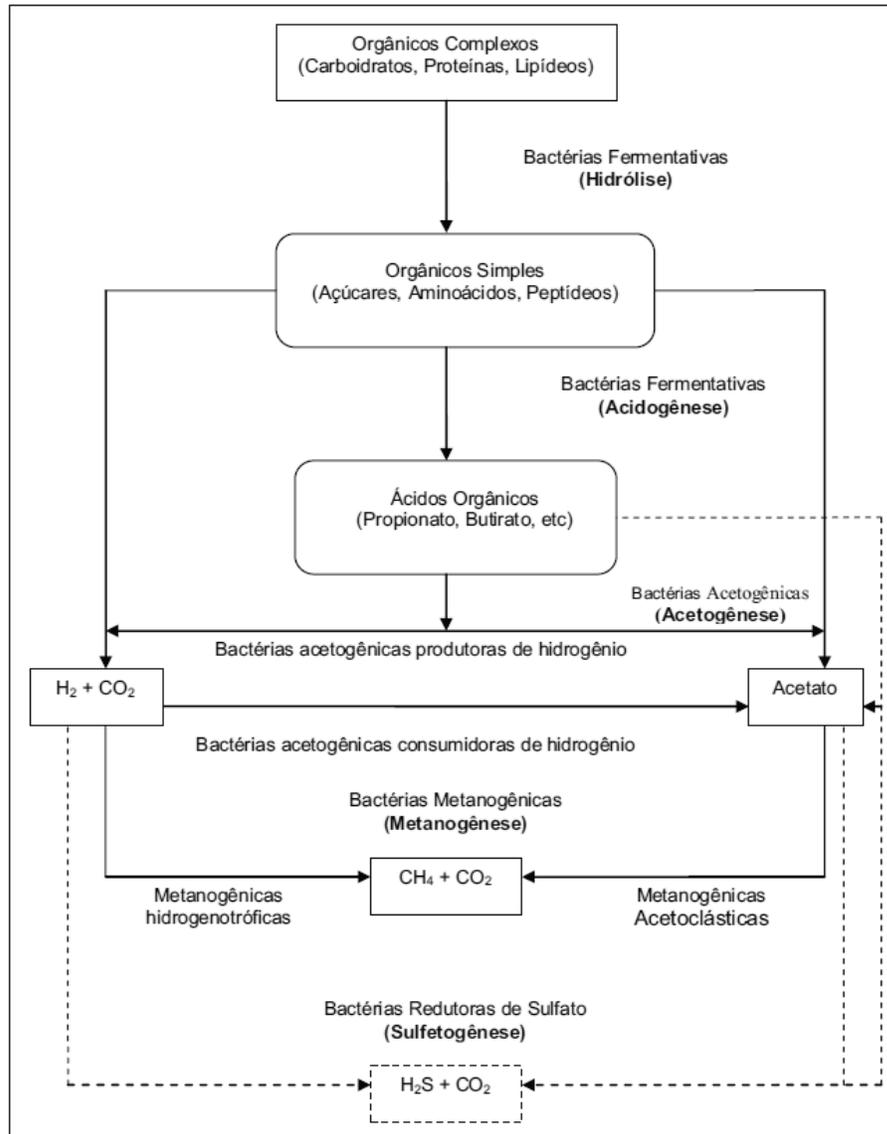
Na acetogênese, ocorre a oxidação dos produtos intermediários formados na acidogênese pelas bactérias acetogênicas. O propionato e o butirato são transformados em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, sendo estes os substratos das bactérias metanogênicas (CHERNICARO, 1997; FARIA *et al.*, 2012).

A metanogênese é a última fase de degradação do substrato, nesta etapa ocorre a formação de metano pelas bactérias metanogênicas. Esses microrganismos utilizam um grupo limitado de substrato, como o ácido acético, ácido fórmico, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, metilaminas e metanol (CHERNICARO, 1997).

Os microrganismos metanogênicos são divididos em dois grupos principais de bactérias. As bactérias que utilizam o acetato como fonte de energia na produção de dióxido de carbono e metano, são denominadas acetoclásticas; e as que utilizam o hidrogênio e dióxido de carbono como fonte de energia, hidrogenotróficas (CHERNICARO, 1997). Embora exista diferença entre as bactérias acetoclásticas e hidrogenotróficas, ambas são importantes no processo da digestão anaeróbia, pois consomem o hidrogênio produzido nas fases anteriores e também atuam na regulação do pH em uma faixa aceitável tanto para a sobrevivência como para a produção de metano (NUVOLARI, 2003).

A Figura 4 apresenta o processo de digestão anaeróbia para tratamento de efluentes e resíduos sólidos orgânicos.

Figura 4 - Etapas da digestão anaeróbia



FONTE: Chernicharo (1997)

O desempenho de um biodigestor depende do monitoramento de determinados parâmetros, tais como o pH, temperatura dentre outros (YADVIKA *et al.*, 2004). Conforme Colusse (2017), qualquer variação que ocorrer nestes parâmetros pode afetar de forma drástica a produção de biogás, conseqüentemente, a produção de metano. Portanto, é preciso encontrar uma faixa de operação para o sistema funcionar de forma otimizada.

O pH é um parâmetro que pode inibir o desenvolvimento de determinados microrganismos, afetando conseqüentemente a produção do metano. O valor ótimo de pH depende dos microrganismos presentes no sistema (LEMA,1997). Geralmente, a faixa ótima de pH deve ser próximo da neutralidade, visto que para o desenvolvimento das bactérias metanogênicas a faixa de pH é de 6,5 a 8,2 (SPEEC, 1995).

De acordo com Colusse (2017), o tamanho das partículas pode influenciar na produção de gases em um sistema de digestão anaeróbio. Partículas de dimensões grandes podem dificultar o processo de degradação via microbiológica e causar entupimentos no biodigestor, enquanto, que partículas de menores dimensões proporcionam uma melhor degradação biológica devido a uma maior superfície de contato, resultando no aumento da produção de biogás.

A atividade enzimática das bactérias é influenciada diretamente pela temperatura, visto que alterações afetam as taxas enzimáticas, bem como a desnaturação ou capacidade de produção de enzimas pelos microrganismos, em virtude disso, a estabilização da matéria orgânica é comprometida (REIS, 2012).

Durante a fermentação anaeróbia, faixas de temperatura são definidas de acordo com o crescimento das bactérias, como a faixa psicofílica (0 a 20°C), faixa mesofílica (20 a 45°C) e faixa termofílica (45 a 70°C) (LEMA, 1997). Conforme Speec (1995), as faixas ótimas de temperatura para a operação são a mesofílica (35°C) e termofílica (55°C).

Os substratos são a fonte de alimento das bactérias, ou seja, deve disponibilizar os elementos essenciais para o metabolismo e atividades enzimáticas. Elementos como o cálcio, magnésio, potássio, sódio, zinco, ferro, cobalto, cobre, molibdênio e manganês são requeridos. Porém, em altas concentrações, inibem o processo de digestão anaeróbia (PECORA, 2006).

O ambiente no qual ocorre a digestão anaeróbia, deve ser favorável para os microrganismos, havendo o controle e a eliminação de constituintes tóxicos, tais como organoclorados e metais pesados, que mesmo em baixas concentrações são prejudiciais no processo (CHERNICHARO, 1997; POL *et al.*, 1998).

Na produção do biogás, o sistema deve estar com ausência de oxigênio. Nenhuma das atividades biológicas exercidas pelos microrganismos anaeróbios requer oxigênio

gasoso, assim como seu desenvolvimento, metabolismo e reprodução. Existem muitas bactérias facultativas que na presença de oxigênio, produzirão dióxido de carbono ao invés de metano (SALOMON, 2007). As bactérias metanogênicas em presença de oxigênio tendem a cessar a produção de metano, podendo a presença de oxigênio ser considerada tóxica.

3.5 Conversão do biogás em energia

A energia química contida no biogás pode ser convertida em calor ou eletricidade através da combustão. Se o objetivo for a geração de calor, o biogás é alimentado em caldeiras de combustão e a energia gerada é transferida para a água. Entretanto, caso o objetivo seja a geração de eletricidade, o biogás é alimentado em motores de combustão interna (motores de ciclo Otto ou turbinas) ou cadeiras que geram o vapor para a produção de eletricidade em turbinas movidas a vapor (ABATZOGLOU e BOIVIN, 2008).

As tecnologias mais utilizadas para a conversão do biogás em energia elétrica são as turbinas a gás e os motores de combustão interna (ciclo Otto). No que se refere as turbinas a gás, estas são divididas em microturbinas quando a potência possui uma faixa de até 100 kW; e turbinas de médio ou grande porte, quando a potência parte de 100 kW até 300 MW (COSTA, 2006).

Existem também as turbinas a vapor, que operam convertendo a energia térmica do vapor gerado em um sistema de cogeração (caldeira a gás) em energia mecânica, sem a utilização direta de um combustível, como acontece nas turbinas a gás. No entanto, os motores de combustão interna funcionam transformando a energia térmica contida em um combustível com o acionamento de pistão no interior de cilindros (COSTA, 2006).

3.5.1 Turbina a gás

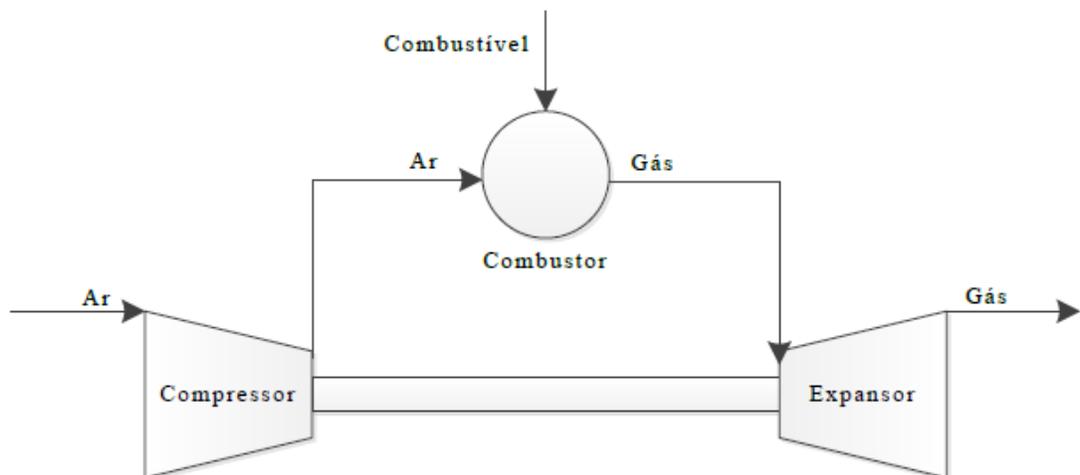
Entende-se por turbina a gás uma máquina térmica operando em ciclo Bryton, constituída de compressor, combustor e turbina de expansão. A quantidade de

compressores, turbinas e configuração do eixo podem variar (DALTRO e RODRIGUES, 2013).

Na turbina a gás o ar é comprimido e injetado na câmara de combustão fornecendo oxigênio para a queima do combustível. A reação exotérmica à alta pressão transfere a energia química do combustível para os gases, elevando a sua temperatura. Na turbina, ocorre a expansão do gás resultante, permitindo a extração da energia mecânica para acionamento do compressor e da carga aplicada ao eixo (COSTA, 2006).

A operação das turbinas a gás pode ocorrer em ciclo aberto ou fechado. No ciclo aberto não há o retorno do fluido de trabalho, os gases resultantes da combustão se expandem na turbina e fornecem potência ao compressor, posteriormente saem pelo bocal de exaustão, enquanto que no ciclo fechado o fluido de trabalho permanece no sistema (MENESES, 2011). A Figura 5 exemplifica uma turbina a gás operando em ciclo aberto.

Figura 5 - Turbina a gás operando em ciclo aberto



FONTE: Daltro e Rodrigues (2013)

As turbinas a gás possuem ampla utilização, desde simples finalidades, como acionamentos mecânicos, até como túneis de vento ou impulsão de aviões. Conforme a aplicação da turbina, será considerada uma turbina a jato ou uma turbina para acionamento mecânico (DALTRO e RODRIGUES, 2013).

3.5.2 Microturbinas a gás

Segundo Costa (2006), as microturbinas são pequenas turbinas com potência de 30 kW que operam com o ciclo Brayton, utilizando o mesmo princípio das turbinas de grande porte. As microturbinas derivam-se da tecnologia utilizada nas APU's (Airborne Power Unit), que fornecem a energia elétrica para os aviões quando estes estão sobre o solo com as turbinas principais desligadas.

O funcionamento da microturbina se dá pela utilização da energia gerada pela turbina para mover o compressor que está ligado em um único eixo girante. Este compressor direciona o ar para a câmara de combustão, onde ocorre uma mistura do ar comprimido com o combustível, possibilitando a combustão contínua. O gás proveniente da combustão possui temperaturas elevadas e então na turbina, ocorre a expansão, resultando na transformação da energia térmica em energia mecânica. O gerador de energia elétrica, é conectado ao mesmo eixo (BONA e FILHO, 2004).

3.5.3 Motores de combustão interna

Normalmente a nomenclatura “motor de combustão interna” é utilizada para motores alternativos, tais como os que compõem os automóveis, caminhões e ônibus. Grande parte das turbinas a gás são motores de combustão interna, porém do tipo rotativo. Nesses motores citados, o processo ocorre com os movimentos alternativos dentro do arranjo cilindro-êmbolo (PIEROBON, 2007).

Segundo Pierobon (2007), existem dois tipos de motores de combustão interna alternativo: o motor com ignição por centelha e o motor com ignição por compressão. No motor com ignição por centelha, ocorre uma mistura de combustível e ar que é incendiada por uma faísca produzida pela vela. No motor com ignição por compressão, ocorre o aumento da pressão e temperatura do ar até certo ponto em que o combustível injetado, incendeia-se espontaneamente.

O motor com ignição por centelha é conhecido por motor do ciclo Otto. Em 1987, o engenheiro alemão Nikolaus August Otto, foi o responsável por desenvolver o ciclo

“Otto” de quatro tempos, que ainda é muito utilizado nos dias atuais (COSTA, 2006). Esses motores são leves e de baixo custo, são utilizados especialmente nos automóveis (PIEROBON, 2007).

Já o motor com ignição por compressão é conhecido por motor do ciclo Diesel. Também foi criado por outro engenheiro alemão, Rudolph Diesel. O motor a diesel é projetado para ser mais forte e mais potente que o movido a gasolina, por isso equipam máquinas pesadas, locomotivas, navios e alguns automóveis (COSTA 2006).

3.5.4 Combustão em caldeiras

As caldeiras são utilizadas em processos que demandam calor ou energia, como processos em indústrias, frigoríficos e hospitais, além de serem utilizadas em sistemas de cogeração, onde a energia excedente é aproveitada para a produção de eletricidade (MOREIRA, 2011).

O processo em uma caldeira consiste na transferência do calor da combustão para a água em um sistema fechado sem contato direto. São classificadas em caldeiras aquatubulares e flamotubulares. Nas caldeiras aquatubulares, a água circula por entre os tubos e este modelo de caldeira possui uso mais abrangente, desde pequenas demandas até centrais termelétricas, enquanto que nas caldeiras flamotubulares, os gases quentes circulam pelos tubos e são caldeiras utilizadas em instalações de pequeno porte (BAZZO, 1995).

A utilização do biogás para a combustão direta em caldeiras permite a produção de vapor para os processos agroindustriais, além da utilização para o próprio aquecimento do biodigestor, sendo assim, quando se tem o controle de temperatura e eficiência energética destes equipamentos, esta varia em torno de 75 a 85% de eficiência de conversão (KRICH *et al.*,2005).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Londrina.

4.1 Biodigestores

Os biodigestores de escala de bancada foram operados em batelada e desenvolvidos em garrafas de plástico, como representado na Figura 6. Foram utilizadas 14 garrafas de 300 mL, seladas com tampas de plástico com lacre. Na tampa de cada foi conectado um tubo de silicone e uma seringa descartável de 60 mL. A medição dos gases foi realizada pela seringa, sendo registrada a produção de biogás diariamente ao longo do tempo. Além disso, os biodigestores foram armazenados em uma incubadora bacteriológica a 35°C durante 8 dias, de modo a garantir o sucesso da degradação na fase mesofílica.

Figura 6 - Biodigestores utilizados



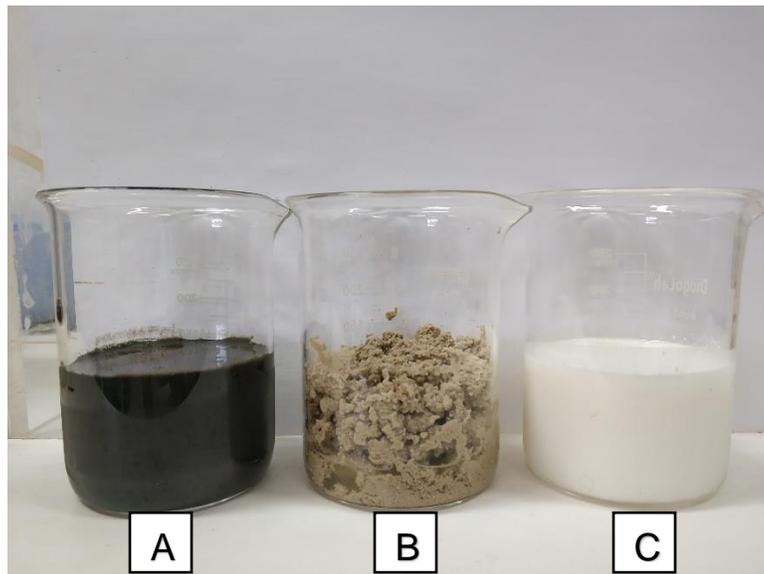
FONTE: Autoria própria (2019)

4.2 Delineamento experimental

Os resíduos empregados neste trabalho foram: lodo proveniente de biodigestor anaeróbio, lodo de laticínios e leite de descarte.

O lodo de biodigestor anaeróbio foi obtido na Universidade Estadual de Londrina (UEL), proveniente da digestão de resíduos orgânicos alimentares. Este lodo serviu como inóculo, no qual garante a existência de células viáveis de bactérias metanogênicas e de um ecossistema anaeróbio, que irá viabilizar e acelerar o processo de digestão anaeróbia (ALVES, 2008; MACIEL 2009). O lodo de estação de tratamento de indústria de laticínios foi disponibilizado por uma indústria de laticínios localizada no Paraná. O leite de descarte foi simulado com um leite de validade expirada de modo a exemplificar um leite inadequado para consumo. A Figura 7 ilustra os resíduos utilizados.

Figura 7 - A) lodo anaeróbio, B) lodo de laticínios e C) leite



FONTE: Autoria própria (2019)

Um material para servir de inóculo não deve produzir quantidades significativas de biogás. Por isso, normalmente, lodos anaeróbios que já estão em processo final de biodigestão podem ser utilizados para auxiliar a degradação de um substrato específico. Assim, espera-se que a produção de biogás do inóculo seja relativamente baixa quando observada isoladamente em sistemas de biodigestores.

As proporções de lodo de laticínios e leite adicionadas nos biodigestores foram determinadas por um planejamento estatístico, pelo método do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). A proporção de inóculo foi definida como constante com valor de 30% do volume ocupado pelo lodo de laticínios e de leite no biodigestor. Desta forma, duas variáveis independentes foram definidas: volume adicionado de lodo de laticínios e leite de descarte para avaliação da produção de biogás, no qual foi a variável dependente. O resultado do planejamento estatístico é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores reais de lodo de laticínios e leite de descarte determinados pelo método DCCR para os biodigestores

Biodigestor	Valores codificados		Valores reais	
	Lodo de laticínios	Leite de descarte	Lodo de laticínios (mL)	Leite de descarte (mL)
1	-1	-1	16,3	4,8
2	1	-1	40,4	4,8
3	-1	1	16,3	25,7
4	1	1	40,4	25,7
5	-1,41	0	11,3	15,3
6	1,41	0	45,4	15,3
7	0	-1,41	28,4	0,5
8	0	1,41	28,4	30,0
9	0	0	28,4	15,3
10	0	0	28,4	15,3
11	0	0	28,4	15,3

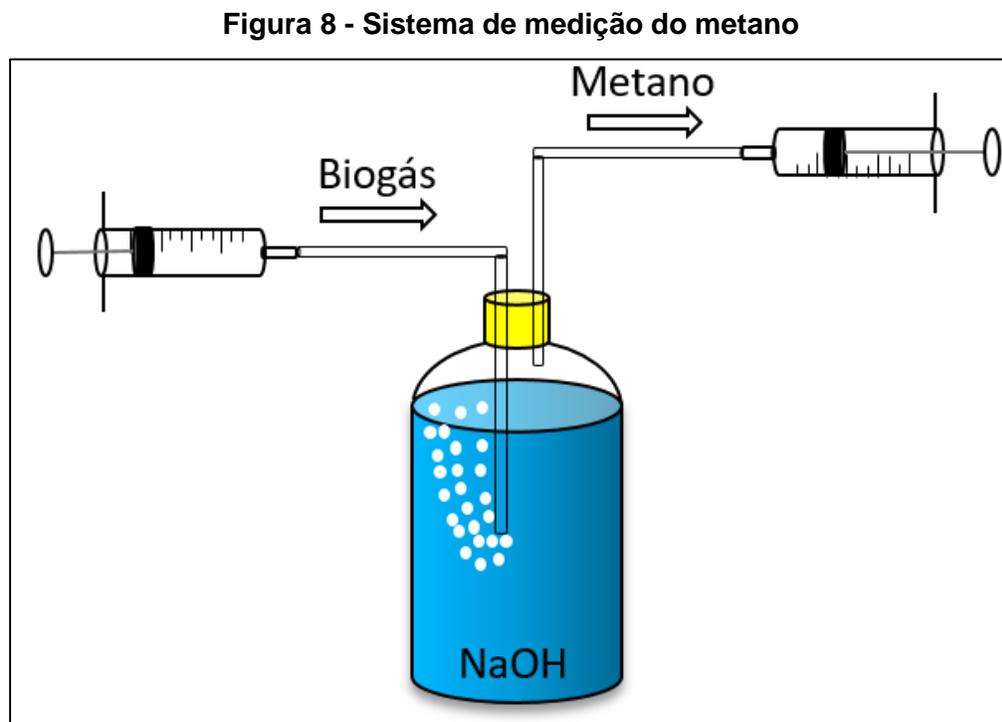
FONTE: Autoria própria (2019)

A produção de metano no biodigestor de controle (branco), no qual contém apenas 50 mL de inóculo sem substrato, foi subtraída da produção de biogás obtida nos ensaios com o substrato para obtenção dos resultados finais de produção de biogás (CROVADOR, 2014).

O modelo matemático gerado pelo método (DCCR) foi validado estatisticamente pela análise da variância (ANOVA) a um nível de confiança de 95%.

4.3 Análise qualitativa do biogás

A análise qualitativa do biogás foi realizada com a utilização da técnica de identificação volumétrica do metano pelo método de deslocamento de volume. O sistema foi montado baseando-se na técnica descrita na apostila de Foresti *et al.* (2005), que tem como princípio a utilização da solução de hidróxido de sódio (NaOH) 50 g L⁻¹ para capturar o dióxido de carbono (CO₂) e o gás sulfídrico (H₂S), conforme mostra o esquema representado na Figura 8.

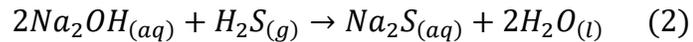


FONTE: Autoria própria (2019)

O sistema foi montado com a utilização de uma garrafa vedada contendo a solução de NaOH. Na tampa da garrafa foram realizados dois furos, um para conectar um tubo de silicone junto a uma seringa vazia para aferição do metano (CH₄) e o outro furo para conectar a seringa que contém o biogás proveniente dos biodigestores após o fim do período de digestão analisado.

O funcionamento do sistema consiste no borbulhamento do biogás na solução de NaOH, onde será absorvida as impurezas deste, como o CO₂ e o H₂S, convertendo-os

em carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sulfeto de sódio (Na_2S) respectivamente. As Equações 1 e 2 ilustram as reações.



Logo após acontecerem as reações 1 e 2, o metano é liberado na forma gasosa e há o aumento da pressão no recipiente, resultado em um deslocamento na seringa vazia. Assim, o volume deslocado na seringa, corresponderá ao volume de CH_4 produzido nos biodigestores.

Os erros na medição da composição química do biogás devem ser levados em consideração na análise dos resultados, pois os valores obtidos não são absolutos, portanto, o método utilizado é uma estimativa da composição química do gás de entrada.

4.4 Análises físico-químicas

Foram realizadas análises físico-químicas, afim de caracterizar os resíduos antes e após o processo de biodigestão. Os parâmetros avaliados foram: pH, sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis e ácido graxos voláteis para o inóculo, lodo de laticínios e leite de descarte. Os equipamentos utilizados nas análises são mostrados a seguir:

- pHmetro: ION, modelo pHB 500;
- Condutímetro: THERMO SCIENTIFIC modelo ORION 3 STAR;
- Balança analítica: SHIMADZU, modelo AW 220;
- Estufa bacteriológica: TECNAL, modelo TE-392/2;
- Estufa de secagem: SOLAB, modelo SL100;
- Forno Mufla: MARCONI, modelo MA385;
- Incubadora de bancada com agitação orbital: QUIMIS, modelo Q816M20.

4.4.1 pH e condutividade elétrica

Para os resíduos sólidos, o pH foi determinado pela metodologia proposta por Tedesco et al. (1995) e ocorreu da seguinte forma:

Aproximadamente 10 gramas da amostra foram colocadas em um béquer e com o auxílio de uma proveta foram adicionadas 100 mL de água deionizada. Em seguida, o béquer foi agitado em um shaker por 30 minutos e ficou em repouso por uma hora. Por fim, o pH e a condutividade elétrica foram medidos no sobrenadante com a utilização de um pHmetro e um condutímetro previamente calibrados.

No resíduo líquido, o pH foi determinado pelo método potenciométrico 4500H+B (APHA, 2012).

4.4.2 Série de sólidos

O ensaio da série de sólidos foi realizado em todos os resíduos, seguindo a metodologia gravimétrica 2540 proposta pela American Public Health Association - APHA (2012).

A metodologia descreve resumidamente: primeiramente os cadinhos foram calcinados em mufla a 580° C por 30 minutos, em seguida pesados em balança analítica e a massa (P0) anotada. Ainda com o cadinho sobre a balança, foi adicionado um volume da amostra, anotando a massa (P1). Os cadinhos foram deixados na estufa a 105° C por 24 horas. Após esse período, os cadinhos foram resfriados no dessecador e então, fez-se pesagem da massa (P2). O Cálculo dos sólidos totais (ST) foi realizado utilizando a Equação (3), mostrada a seguir:

$$ST(\%) = \frac{(P2 - P0)}{(P1 - P0)} * 100 \quad (3)$$

Onde:

ST: sólidos totais (%);

P0: massa do cadinho após calcinação (g);

P1: massa do cadinho + massa úmida da amostra (g);

P2: massa do cadinho + massa seca da amostra (g);

Os cadinhos com massa seca da amostra foram colocados em forno mufla a 550° C durante duas horas. Após o resfriamento no dessecador, pesou-se os cadinhos, e assim foi obtida a massa de cinzas (P3). Os sólidos voláteis (SV) e fixos (SF) foram calculados a partir das Equações 4 e 5 respectivamente.

$$SV(\%) = \frac{(P2 - P0) - (P3 - P0)}{(P2 - P0)} * 100 \quad (4)$$

$$SF(\%) = ST(\%) - SV(\%) \quad (5)$$

Onde:

ST: sólidos totais (%);

SV: sólidos voláteis (%);

SF: sólidos fixos (%);

P0: massa do cadinho após calcinação (g);

P1: massa do cadinho + massa úmida da amostra (g);

P2: massa do cadinho + massa seca da amostra (g);

P3: massa do cadinho + massa calcinada da amostra (g).

4.4.3 Ácidos graxos voláteis

A determinação dos ácidos graxos voláteis foi realizada conforme a metodologia proposta por Kapp (1984), na qual consiste de um método titulométrico descrito por Buchauer (1998). O volume de ácido gasto na titulação de pH 5,0 a pH 4,0 em 20 mL de amostra, é utilizado para o cálculo da concentração dos ácidos graxos voláteis, conforme Equação 6.

$$VA_{5-4,sa} = -0,0283 + 0,09418 * \frac{S_a}{60} \quad (6)$$

Onde:

S_a = ácidos graxos voláteis (mg L^{-1});

$VA_{5-4,sa}$ = volume de ácido (mL) necessário para titular uma amostra de pH 5,0 a pH 4,0 devido ao tampão de S_a .

4.5 Digestão de lodo de laticínios e inóculo

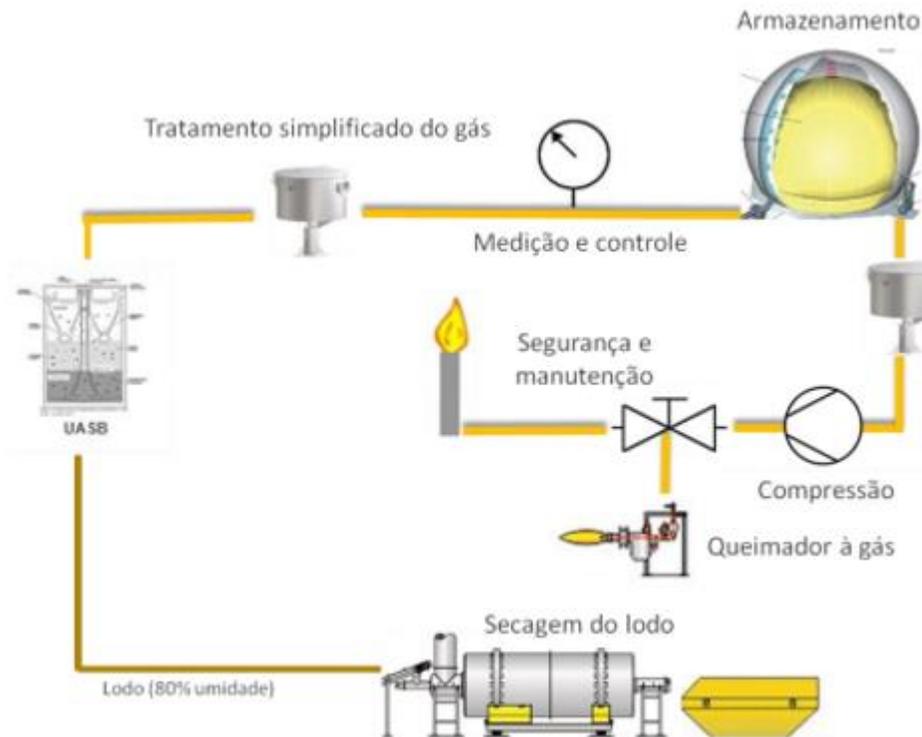
Foram montados dois biodigestores identicamente aos descritos no item 4.2, contendo apenas lodo de laticínios (87 mL) e inóculo (103 mL), limitados a um teor de sólidos totais em 10% nesses biodigestores, com a finalidade de verificar o potencial de geração de biogás do lodo de laticínios associado ao inóculo para analisar a viabilidade econômica de um sistema de digestão com esse resíduo. Neste ensaio em duplicata verificou-se apenas a produção do biogás ao longo do tempo e sua qualidade, excluindo-se análises como pH, ensaio de sólidos e AGV (ácidos graxos voláteis).

4.6 Análise preliminar da viabilidade de geração de energia

A análise da viabilidade econômica da utilização do biogás produzido foi realizada em duas situações diferentes: utilização do biogás considerando apenas biodigestão de leite e inóculo, e a segunda situação utilização do biogás considerando a biodigestão de lodo de laticínios, leite e inóculo. Em cada situação, realizou-se a análise da conversão do biogás em diferentes vias.

Para a implantação do sistema, baseou-se no arranjo descrito no trabalho de Valente (2015) para queima do biogás, que contém os principais componentes necessários: biodigestor, limpador de gases, medidor de vazão, gasômetro e compressor, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma das etapas de um sistema de aproveitamento do biogás



FONTE: Adaptado de Valente (2015)

Com o PCI do biogás (kWh m^{-3}) de acordo com a quantidade de metano, será possível calcular a receita gerada do biogás na utilização de sua energia comparado com o custo do kWh da concessionária de energia. A Figura 10 mostra o quadro do poder calorífico do biogás de acordo com o teor de metano presente.

Figura 10 - Quadro do poder calorífico do biogás com relação ao teor de metano

Biogás	Teor de CH_4 [% em vol.]	Poder calorífico inferior PCI_n [kWh/m^3]
Biogás de tratamento anaeróbio de lodo	60 – 70	6,0 – 7,0
Biogás do tratamento anaeróbio de esgoto com elevada carga orgânica	50 – 85	5,0 – 8,5
Biogás de biodigestores agrícolas	55 – 70	5,5 – 7,0
Biogás de estações de tratamento de resíduos orgânicos	55 – 65	5,5 – 6,5
Biogás da deposição de resíduos	55 – 60	5,5 – 6,0
Biogás de culturas energéticas (biomassa dedicada)	45 – 55	4,5 – 5,5

FONTE: Valente (2015)

4.6.1 Sistema de codigestão 1

O sistema de codigestão 1 é caracterizado por produzir biogás apenas com leite de descarte e inóculo. Estima-se que de 2 a 4% da produção total de leite na china sejam descartados, enquanto que no Brasil não há uma estimativa do volume descartado (GOMES, 2018). A geração diária de leite foi estimada para uma empresa localizada no norte do Paraná de acordo com os dados fornecidos pelo 21º ranking das maiores empresas de leite do Brasil 2017 (LEITE BRASIL, 2017). Considerou-se que 2% do total produzido são descartados diariamente. A empresa possui 2.036 produtores de leite e produz 242 litros de leite por produtor dia⁻¹. A Equação 7 foi utilizada para calcular o volume diário gerado.

$$V = N * P * d \quad (7)$$

Onde:

V = Volume diário gerado (L dia⁻¹);

N = número de produtores de leite;

P = litros de leite por produtor dia⁻¹ (L dia⁻¹);

d = percentual de descarte (0,02).

Portanto, a produção diária de leite descartado é de 9.854,54 L. Logo, o volume de biogás produzido relacionado com a quantidade de leite descartado, foi encontrado com a utilização da Equação 9, obtendo um volume de 57 m³ de biogás. A Tabela 4, ilustra a equivalência do biogás produzido quando comparada com as fontes usuais.

Tabela 4 - Equivalência de 57 m³ de biogás comparado com fontes usuais

Combustível	Equivalência
Gasolina (L)	366,61
Querosene (L)	372,62
Óleo Diesel (L)	330,55
Gás Liquefeito de Petróleo - GLP (L)	859,43
Etanol (L)	480,80
Carvão Mineral (Kg)	444,74
Lenha (kg)	2103,5

FONTE: Autoria própria (2019)

4.6.2 Sistema de codigestão 2

O sistema de codigestão 2 é caracterizado por produzir biogás com leite de descarte, lodo de laticínios e inóculo. Primeiramente, foi determinada a geração de cada resíduo. Para o leite de descarte, considerou-se o mesmo volume descrito na metodologia do item anterior, sendo de 9.854,54 L. A quantidade de lodo gerado diariamente foi estimada em 12.000 Kg. Correlacionando esses valores com os obtidos experimentalmente nos biodigestores do ensaio da digestão de lodo de laticínios e inóculo, foi possível encontrar o volume de biogás produzido em escala real, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Volume de biogás obtido na biodigestão de lodo de laticínios e inóculo

Biodigestor	Lodo de laticínios (kg)	Biogás (m³)
Escala bancada	0,07667	0,000137
Escala real	12.000	21,44

FONTE: Autoria própria (2019)

A Tabela 6 ilustra a equivalência do biogás produzido (lodo de laticínios e leite de descarte) de 78,44 m³ quando comparado com as fontes usuais.

Tabela 6 - Equivalência de 78,44m³ de biogás comparado com fontes usuais

Combustível	Equivalência
Gasolina (L)	13,08
Querosene (L)	13,29
Óleo Diesel (L)	11,79
Gás Liquefeito de Petróleo - GLP (L)	30,66
Etanol (L)	17,15
Carvão Mineral (Kg)	15,87
Lenha (kg)	75,04

FONTE: Autoria própria (2019)

4.6.3 Período de retorno do investimento

O tempo de retorno do investimento realizado em equipamentos para os sistemas de codigestão é calculado a partir da Equação 8 com base na receita anual gerada pela economia de kWh fornecida pelo biogás produzido.

$$Investimento = Receita_{anual} * \left[\frac{(1 + i)^n - 1}{(1 + i)^n * i} \right] \quad (8)$$

Onde:

i: taxa de juros (6% a.a.);

n: tempo de retorno do investimento (anos);

Investimento: custo de implantação do sistema;

Receita anual: economia anual obtida com a utilização do sistema.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho são provenientes da realização de duas etapas de ensaios na produção de biogás ao longo do tempo. A primeira etapa foi realizada com lodo de FAD (flotação por ar dissolvido), leite de descarte e inóculo em sistema de bancada pelo método estatístico de delineamento experimental e a segunda etapa foi realizada de forma simplificada com o intuito de verificar o potencial de geração de biogás com lodo de laticínios e inóculo.

5.1 Caracterização físico-química dos resíduos orgânicos

A caracterização físico-química dos resíduos da indústria de laticínios permite avaliar e discretizar processos e análises relativos ao potencial de produção de biogás.

As medições e análises dos resíduos orgânicos (RO) utilizados neste trabalho são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização dos resíduos que foram utilizados na biodigestão

Resíduos	pH	Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Teor de umidade (%)	Teor de ST (%)	SV (%)	SF (%)
Inóculo	7,85	10.010	95,66	4,34	65,68	34,32
Lodo de laticínios	5,42	581	79,78	20,22	93,49	6,51
Leite de descarte	6,74	5.520	90,51	9,49	92,22	7,78

FORNECIDA: Autoria própria (2019)

O pH dos resíduos inóculo e leite de descarte possui valor adequado para tratamento por processos anaeróbios (ZILOTTI, 2012) com valores de 7,85 e 6,74, respectivamente (Tabela 7). O pH do lodo de laticínios possui um valor relativamente baixo (menor que 6,0) para tratamento por sistemas biológicos. Assim, uma mistura composta foi realizada para propiciar valores de pHs iniciais maiores que 6,0 nos biodigestores.

Os sólidos presentes no lodo foram característicos de lodos de FAD subsequente a uma centrífuga com valor médio de 20,22% (Tabela 7), com destaque para a quantidade de sólidos voláteis presentes, 93,49%, que indica uma quantidade

predominante de matéria orgânica no lodo de ETE (estação de tratamento de efluentes) da indústria de laticínios.

O leite apresentou sólidos totais no valor de 9,49% (Tabela 7), próximo de valores obtidos por Ribas *et al.* (2004), que encontrou valores de 11,78 a 12,83%. O inóculo apresentou sólidos totais de 4,34% e sólidos voláteis de 2,85%, correspondente a 65,68% dos sólidos totais, valores próximos ao lodo anaeróbio utilizado como inóculo no trabalho de Heberle (2013), que apresentou valores de ST de 6,64%, SV de 63,08% e SF de 36,92%.

Assim, pode-se caracterizar os resíduos utilizados neste trabalho como substratos orgânicos que apresentam potencial para a geração de biogás devido aos valores elevados de SV, maiores que 90% (Tabela 7). Fato que indica presença de matéria orgânica que pode ser convertida em biogás no processo anaeróbio.

Além disso, o pH do leite de descarte apresenta pH próximo do neutro e o pH do inóculo apresenta um valor próximo de 8,0. Fato que auxilia a neutralização do pH do lodo de laticínios com valor abaixo de 6,0. Desta forma, a combinação dos RO favorece o desenvolvimento do ecossistema biológico em reator anaeróbio.

5.2 Produção de biogás

O ensaio do delineamento experimental proposto foi realizado no período de 08/10/2019 a 12/10/2019, com duração total de 4 dias. Durante este período houve a medição diária do biogás produzido. A paralisação na produção do biogás, foi observada a partir do 4º dia, pois inexistiram deslocamentos positivos nas seringas. A Tabela 8 apresenta o volume total acumulado de biogás.

Tabela 8 - Volume total acumulado de biogás

Biodigestor	Lodo de laticínios (mL)	Leite (mL)	Inóculo (mL)	Volume de biogás (mL)
1	16,3	4,8	7,40	0,0
2	40,4	4,8	15,4	0,0
3	16,3	25,7	16,1	171,0
4	40,4	25,7	24,2	166,0
5	11,3	15,3	10,1	89,0
6	45,4	15,3	21,5	70,0
7	28,4	0,5	9,70	56,0
8	28,4	30,0	21,9	182,0
9	28,4	15,3	15,8	99,0
10	28,4	15,3	15,8	92,0
11	28,4	15,3	15,8	110,0
Inóculo	0,0	0,0	50,0	0,0

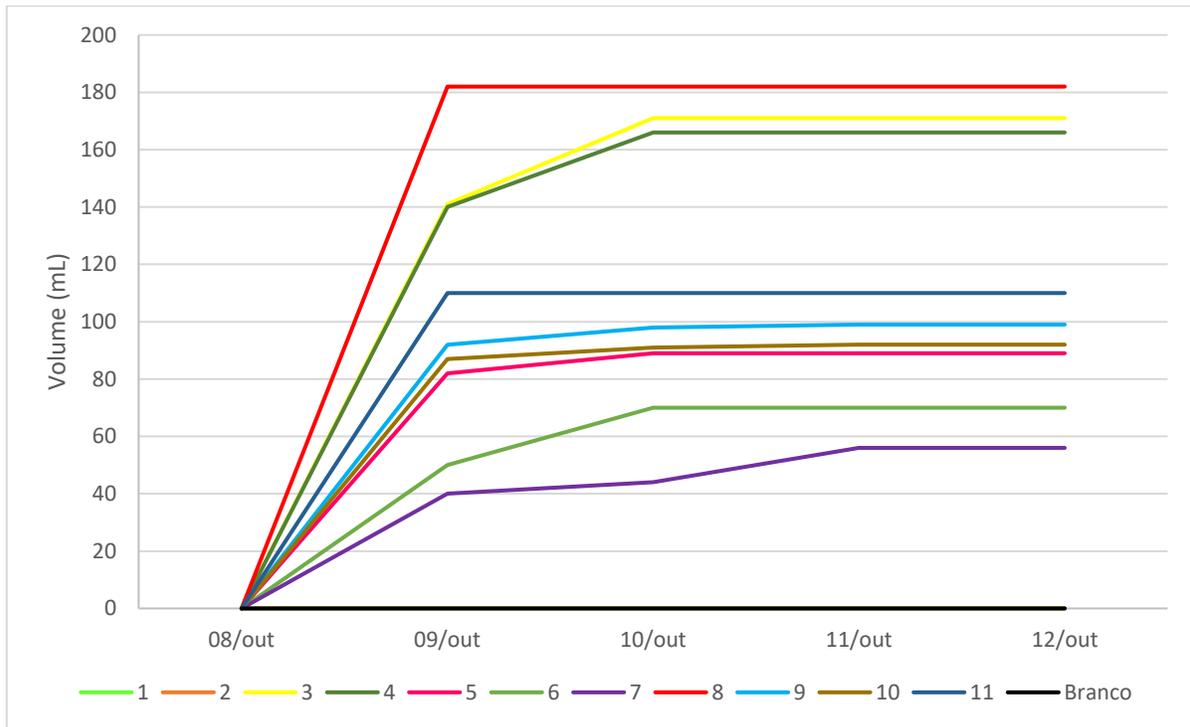
FONTE: Autoria própria (2019)

O inóculo apresentou valores nulos na produção de biogás. Isto está fortemente associado a efluentes digeridos que neste trabalho possuem a função de diluir os sólidos do lodo e permitir que microrganismos adaptados possam realizar o processo de acidogênese e metanogênese a partir do substrato.

Pode-se observar que nos biodigestores 1 e 2 não ocorreu a produção de biogás em contraposição ao biodigestor 7, pois o volume de lodo relativo ao volume de leite nestes sistemas eram de 3,40, 8,42 e 56,80, respectivamente. Desta forma, esperava-se que ocorresse produção de biogás em todos os biodigestores. Esta análise suscitou a necessidade de uma segunda etapa relativo ao ensaio de biodigestor apenas com lodo e inóculo.

O Gráfico 1 apresenta a produção de biogás ao longo do tempo. A maior geração em termos de volume ocorre no primeiro dia de digestão, com mais de 80% da produção total, exceto para os biodigestores 1, 2 e inóculo.

Gráfico 1 - Produção acumulada de biogás



FONTE: Autoria própria (2019)

Os biodigestores 3, 4 e 8 se destacaram na produção de biogás, com 171, 166 e 182 mL respectivamente. Isso ocorreu devido a contribuição do leite no processo, visto que nesses biodigestores, encontra-se a maior fração deste resíduo que contém em sua composição elevado teor orgânico.

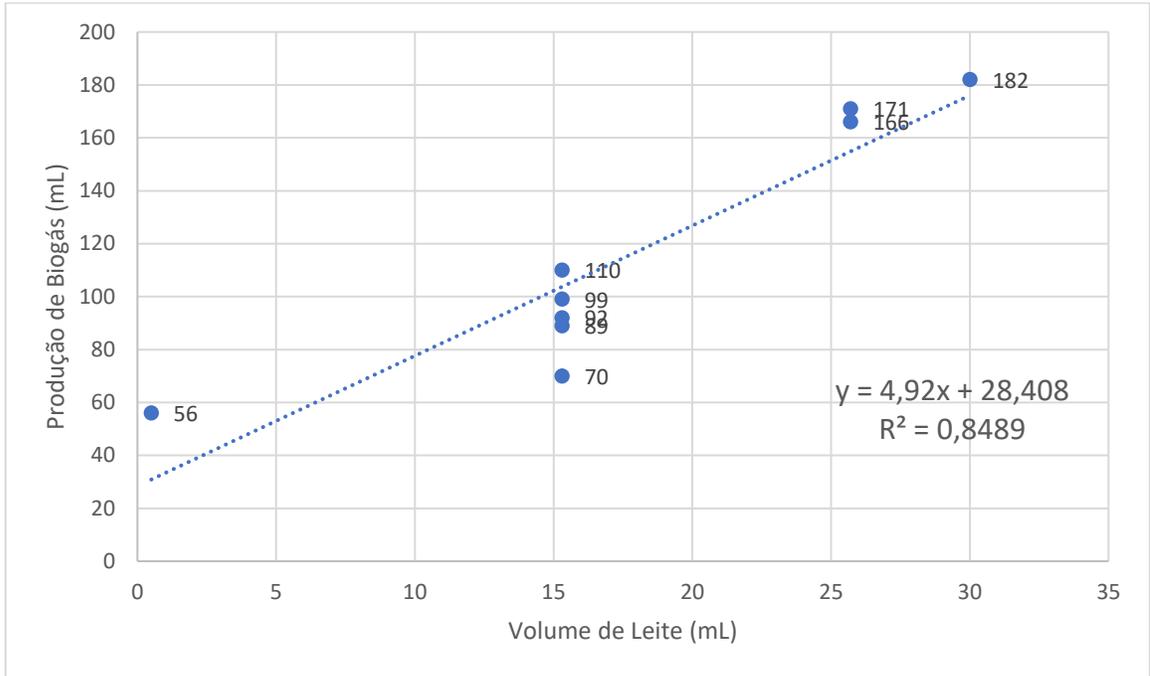
O volume de biogás produzido, está diretamente relacionado com a quantidade e o tipo de resíduo inserido nos biodigestores. A Tabela 9 mostra a relação de volume produzido pelo volume total ocupado dos resíduos em cada biodigestor.

Tabela 9 - Volume de biogás produzido por volume de resíduos nos biodigestores

Biodigestor	Volume total ocupado dos resíduos (mL)	Biogás (mL)	mL Biogás/mL de resíduos
1	30,1	0,0	0,00
2	64,5	0,0	0,00
3	59,7	171,0	3,14
4	94,2	166,0	2,04
5	37,8	89,0	2,60
6	86,4	70,0	0,97
7	41,2	56,0	1,74
8	83,0	182,0	2,46
9	62,1	99,0	1,87
10	62,1	92,0	1,73
11	62,1	110,0	2,07
Inóculo	50,0	0,0	0,00

FONTE: Autoria Própria (2019)

A relação de mL de biogás produzido por mL de resíduos mostra que os biodigestores 3, 5 e 8 obtiveram os melhores resultados, pois neles se encontram uma maior quantidade de leite quando comparada com a quantidade de lodo de laticínios, mostrando novamente a contribuição do volume de leite no potencial de geração de biogás (vide gráfico 2).

Gráfico 2 - Produção de Biogás relativo ao leite de descarte

FONTE: Autoria própria (2019)

Pode-se verificar que o leite de descarte tem o maior potencial para produzir biogás. Sem a inserção dos biodigestores 1 e 2 na elaboração do Gráfico 2, observou-se uma linha de tendência linear com um coeficiente de regressão próximo de 0,85.

O volume de leite inserido nos biodigestores 4, 6, 7, 9, 10 e 11 era menor que o do lodo de laticínios, o que ocasionou uma menor relação de biogás produzido por volume total de resíduos.

Em suma, a produção total de biogás ocorreu no intervalo de 4 dias nos biodigestores, similar ao encontrado no trabalho de Sotti (2014), que analisou a digestão anaeróbia em resíduos orgânicos de restaurante universitário em escala de bancada, obtendo máxima produção de biogás no 3º dia de digestão e finalização a partir do 4º dia.

Neste estudo, observou-se que a partir do 4º dia ocorreu inativação das bactérias metanogênicas, verificada pela não produção de biogás. Essa interrupção pode ter acontecido por conta do acúmulo de ácido graxos voláteis no biodigestor, provenientes da degradação dos compostos orgânicos (etapa da acidogênese), que por consequência provocaram a redução no valor de pH do resíduo orgânico.

Para a obtenção de uma boa eficiência no processo de digestão anaeróbia, se faz necessário propiciar ao sistema condições estáveis de pH na faixa de 6,5 a 7,5 com a manutenção da relação ácido carbônico/carbonato em uma situação de tamponamento. Dessa forma, quando toda alcalinidade é consumida não há a neutralização dos ácidos gerados, conseqüentemente, houve o acúmulo de ácidos voláteis que por sua vez reduzem o pH, tornando o sistema quimicamente instável (ZILOTTI, 2012).

5.3 Teor de umidade e sólidos

A análise de teor de sólidos foi realizada nos biodigestores que produziram biogás na proporção maior que 1:1 (volume de biogás produzido por volume de resíduo) para possibilitar um estudo mais minucioso dos resultados apresentados. O teor de umidade e de sólidos foram determinados para o início e o final do experimento, portanto, ilustrados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Caracterização do teor de umidade e sólidos no início do experimento.

Biodigestores	Início			
	Teor de umidade (%)	Teor de ST (%)	SV (%)	SF (%)
3	89,54	10,46	84,66	15,34
4	87,90	12,10	84,82	15,17
5	89,27	10,73	84,69	15,31
7	84,71	15,29	85,13	14,86
8	88,84	11,16	84,73	15,27
9	87,59	12,41	84,85	15,14
10	87,59	12,41	84,85	15,14
11	87,59	12,41	84,85	15,14

FONTE: Autoria própria (2019)

Tabela 11 - Caracterização do teor de umidade e sólidos no final do experimento

Biodigestores	Final			
	Teor de umidade (%)	Teor de ST (%)	SV (%)	SF (%)
3	92,03	7,97	82,65	17,35
4	92,71	7,29	83,07	16,93
5	93,77	6,23	82,42	17,58
7	89,71	10,29	87,17	12,83
8	93,64	6,36	81,34	18,66
9	91,45	8,55	83,23	16,77
10	91,26	8,74	84,64	15,36
11	92,08	7,92	84,28	15,72

FONTE: Autoria própria (2019)

As Tabelas 10 e 11 apresentam uma redução generalizada da fração de SV nos ST, com exceção do biodigestor 7. Isto pode ter ocorrido pela falta de homogeneização adequada do lodo de FAD no início do preparo dos biodigestores.

Porém, observa-se que ainda existe uma fração relativamente alta de SV, acima de 80% dos ST. Este fato evidencia a possibilidade de aumento de produção nos valores de volume de biogás, pois o processo anaeróbio cessou devido à redução do pH nos testes realizados.

A Tabela 12 apresenta o valor de redução de SV nos biodigestores em valores mássicos e percentuais e o volume de biogás produzido por gramas de SV iniciais da biodigestão.

Tabela 12 - Redução mássica de sólidos voláteis nos biodigestores

Biodigestores	Final			
	Redução do teor de SV inicial (%)	Redução (g SV)	mL de Biogás por g de SV	mL de Biogás por g de SV removido
3	25,61	1,26	46,77	135,71
4	41,00	3,56	32,35	46,63
5	43,49	1,38	49,62	64,49
7	31,09	1,42	17,77	39,44
8	45,29	3,26	46,26	55,83
9	32,42	1,90	25,02	52,11
10	29,75	1,74	22,37	52,87
11	36,61	2,14	29,64	51,40

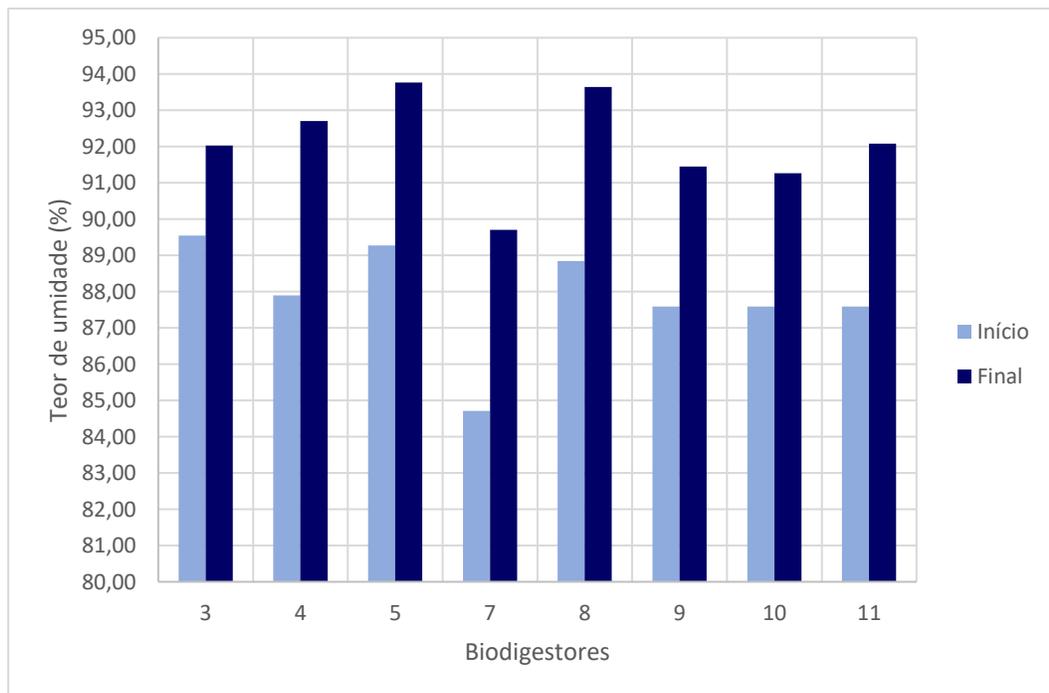
FONTE: Autoria própria (2019)

As maiores reduções de SV ocorreram nos Biodigestores 3, 5 e 8 com valores acima de 40%. A menor redução ocorreu no Biodigestor 3 com valor de 25,61%. Porém, os sistemas com maiores eficiências na biotransformação do material carbonáceo para metano e gás carbônico foram os Biodigestores 3 e 5.

Santos *et al.* (2015) utilizam para indústria de laticínios valores de referência iguais a 0,60 Kg SV m⁻³ para a produção de biogás. O índice deste trabalho foi de 20,15 a 56,28 Kg SV m⁻³. Estes valores corroboram com a necessidade de aumento da alcalinidade para possibilitar a continuidade do processo anaeróbio e consequente diminuição dos índices para valores mais próximos da literatura.

O Gráfico 3 evidencia que o processo de degradação anaeróbia dos resíduos de laticínios transformou parte da matéria orgânica em biogás e parte em material lixiviado, acarretando no aumento de umidade em todos biodigestores. A variação de umidade foi de 84,71% a 93,76% nos biodigestores. Observa-se a menor variação no biodigestor 3 (16,3 mL de lodo e 25,7 mL de leite), de apenas 2,5%, enquanto que no biodigestor 7 (28,4 mL de lodo e 0,5 mL de leite) houve a maior variação, de 5,0%.

Gráfico 3 - Teor de umidade dos biodigestores no início e no final do experimento



FONTE: Autoria própria (2019)

Comparando o biodigestor 3 com o 4 que iniciaram o processo com a mesma quantidade de leite (25,7 mL), porém com quantidade de lodos diferentes (16,3 e 40,4 mL respectivamente), fica evidente a contribuição do teor de umidade no processo, pois o biodigestor 3 iniciou a digestão com o maior teor de umidade do que o 4, produzindo maior volume de biogás com a menor produção de lixiviado. Gadelha (2005) afirma que biodigestores úmidos apresentam maior potencial de geração de biogás.

Após o processo de digestão anaeróbia, verifica-se que o maior percentual de redução de ST ocorreu no biodigestor 8 (contendo 28,4ml de lodo de laticínios e 30,0mL de leite) com 43,00% de redução, resultando na mistura em que mais produziu biogás (182mL), seguido pelo biodigestor 4 (40,4mL de lodo e 25,7mL de leite) com redução de 39,78% e terceira maior produção de biogás (166mL).

O biodigestor 3 obteve a menor taxa de redução de ST, 23,78% com a segunda maior produção de biogás (171mL), denotando a influência dos ST no início do processo, visto que continha menor quantidade de ST (10,46%) comparado ao biodigestor 4 (12,10%). De forma geral, esses resultados indicam a conversão da matéria orgânica em biogás, uma vez que o aumento de SF foi proporcional a redução de SV.

Para se obter um melhor desempenho para produção de biogás, é importante o controle dos sólidos na promoção da degradação anaeróbia. A VDI 4630 (2016) estabelece que a mistura entre inóculo e substrato deve estar limitada a um percentual de ST de 10%.

Chernicharo (1997) relata que a concentração de sólidos voláteis após a digestão anaeróbia deve ser de 50%, sendo essa concentração um indicativo de matéria orgânica não biodegradada pelas bactérias, considerando que essa condição resulta em uma boa eficiência na remoção da matéria orgânica pela digestão anaeróbia. Nesse sentido, ainda poderia ocorrer a produção de biogás nos biodigestores, visto que o valor médio de SV no fim da digestão foi de 83,15%.

Kubaská *et al.* (2010) salientam a importância dos sólidos voláteis para análise da avaliação do rendimento do biogás. Os autores afirmam que o rendimento está associado ao volume de biogás produzido por unidade de sólidos voláteis presentes inicialmente no substrato.

O volume de biogás produzido por unidade de sólidos voláteis teve média de 31 mL g⁻¹ SV⁻¹, com o biodigestor 5 se destacando entre os demais (49,62mL g⁻¹ SV⁻¹). A produtividade foi menor do que a obtida por Kubaská *et al.* (2010), que alcançaram a produtividade de 472 mL g⁻¹ SV⁻¹ em um ambiente controlado, onde a temperatura no reator encontrava-se em 37°C e o tempo de digestão foi de aproximadamente 18 dias.

5.4 pH e ácidos graxos voláteis

O pH nos biodigestores foi levantado no início e no final do processo de degradação, enquanto que os AGV foram medidos somente no final. A Tabela 13 mostra os resultados obtidos.

Tabela 13 - pH dos biodigestores e AGV no final do experimento

Biodigestores	pH		AGV (mg L ⁻¹)
	Início	Final	Final
3	6,01	5,34	6346,74
4	5,82	5,49	6346,74
5	5,97	5,27	6346,74
7	5,58	6,50	6907,36
8	5,92	5,29	6627,05
9	5,79	5,43	6767,21
10	5,79	5,44	6767,21
11	5,79	5,41	6627,05

FONTE: Aatoria própria (2019)

Todos os biodigestores iniciaram o processo próximo do pH 6,0, porém abaixo da faixa de pH ótima (6,5 – 7,5) para os microrganismos metanogênicos. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se redução do pH em todos biodigestores, todavia os valores se mantiveram entre 5,0 e 6,0.

A queda do pH ocorreu devido a produção e acúmulo dos AGV no sistema. Observou-se um pequeno aumento do pH no biodigestor 7, indicando uma produção de alcalinidade pela ocorrência do processo anaeróbico completo. Porém, o biodigestor 7 também cessou sua produção a partir do 4^o dia.

Os valores de AGV demonstram que houve a sua produção durante o processo de acidogênese. Segundo Chernicharo (1997), quando o sistema está em condições

favoráveis com quantidade de bactérias metanogênicas suficientes, as mesmas utilizam os AGV produzidos na velocidade em que estes são formados.

Kondusamy e Kalamdhad (2014) realizaram a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos alimentares e observaram que em concentrações superiores a 2000 mg L⁻¹ de ácidos a atividade microbiana foi inibida afetando assim a geração de biogás. A concentração de AGV alcançou valores maiores que 6000 mg L⁻¹ e a produção de biogás foi interrompida nessas condições. Kugelman e Chin (1971) apud Kjeldsen e Christensen (1990) observam em seu trabalho que concentrações de ácidos (acético, propiônico e butírico) acima de 6000 mg L⁻¹ causaram efeito inibitório na atividade dos microrganismos.

5.5 Qualidade do biogás

Com o intuito de conhecer a qualidade do biogás produzido, utilizou-se a metodologia descrita no item 4.3 nos biodigestores 3 e 6, pois nestes haviam quantidades significativas de biogás acumulado nas seringas.

O biogás produzido nesses biodigestores continha 60% de CH₄ e aproximadamente 40% de CO₂ e uma pequena quantidade de H₂S.

Quanto maior a quantidade de CH₄ presente no biogás produzido, maior será o seu poder calorífico. Nogueira (1986) aponta que a composição média do metano presente no biogás para diferentes resíduos orgânicos varia de 55-75%. Desse modo, o biogás gerado apresenta resultados satisfatórios e indica a possibilidade de usá-lo para a sua conversão em energia quanto a porcentagem de metano.

5.6 Digestão de lodo e inóculo

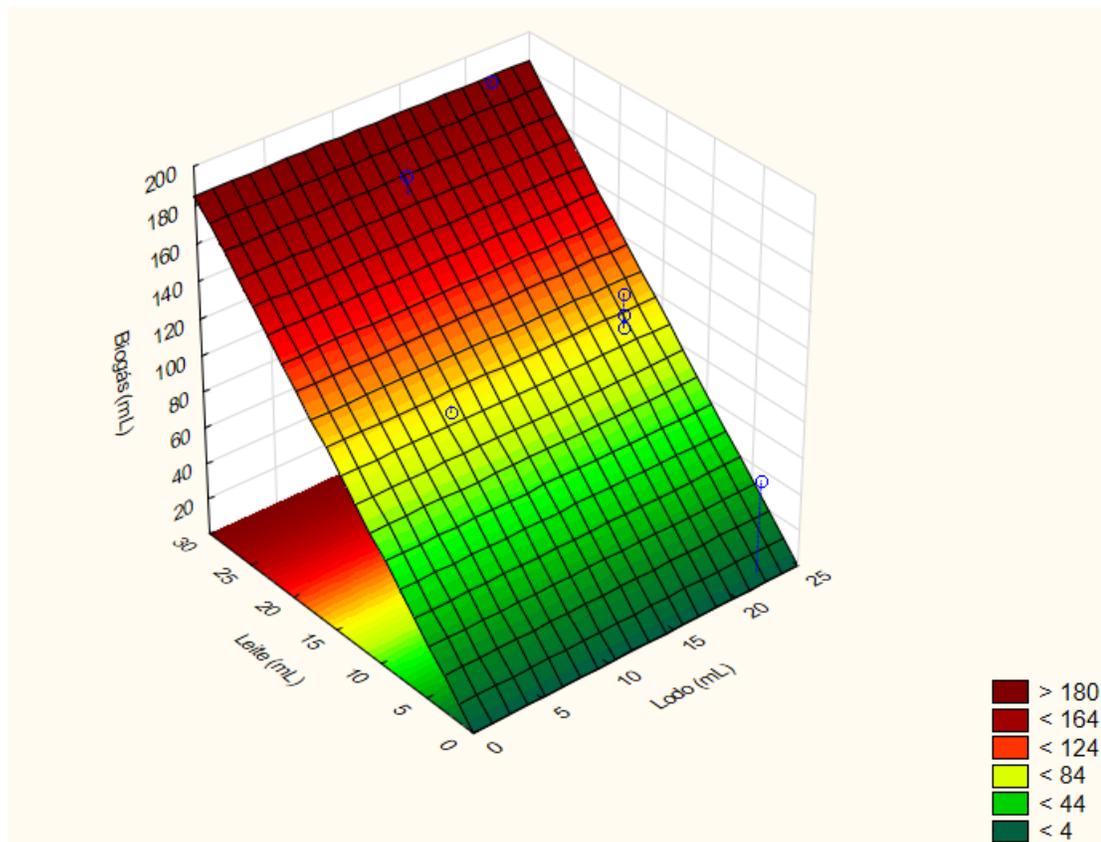
O ensaio de digestão foi realizado do dia 31/10 a 04/11 com duração total de 4 dias, havendo a medição diária do biogás produzido. A paralisação na produção do biogás foi observada a partir do 4º dia, pois inexistiram deslocamentos positivos nas

seringas. O volume acumulado produzido de biogás alcançou valor médio de 137 mL com 60% de CH₄.

5.7 Gráfico de superfície

Utilizando-se dos dados dispostos na Tabela 3, foi possível desenvolver o gráfico de superfície proposto pelo delineamento experimental. O Gráfico 4 mostra a superfície resultante das interações das variáveis independentes lodo de laticínios e leite de descarte com a variável dependente produção de biogás.

Gráfico 4 - Superfície representativa do delineamento experimental



FONTE: Autoria própria (2019)

De acordo com o gráfico, fica evidente a contribuição do leite na produção de biogás e a insignificância do lodo de laticínios no processo, visto que maiores volumes de leite quando utilizados experimentalmente resultarão em maiores volumes de biogás

produzido sem a interferência da quantidade de lodo inserido no sistema. Dessa forma, a Equação 9 linear foi obtida para representar matematicamente o ensaio realizado.

$$y = 5,8199x + 8,8858 \quad (9)$$

Onde:

y = volume de biogás produzido (mL);

x = volume de leite inserido no sistema (mL).

A análise de variância (ANOVA) ao nível de 95% de confiança correspondente ao modelo matemático que representa a produção de biogás indica que a Equação 9 não representa estatisticamente o modelo, visto que o F calculado é menor que o F tabelado. No entanto, o R² indica que 80% dos valores são representados pelo modelo (Vide Tabela 14).

Tabela 14 - Análise de variância (Anova) por regressão aplicada a variável resposta volume de biogás

Variável resposta		gl	SQ	MQ	F- Calculado	F - Tabelado	p	R ²
Volume de biogás (mL)	Regressão	1	29668,681	29668,681	36,300	59,857	0,000196	0,801
	Resíduo	9	7355,865	817,318				
	Total	10	37024,545					

Fonte: Autoria própria, 2019.

gl: Grau de liberdade;

SQ: Soma dos quadrados;

MQ: Média dos quadrados.

5.8 Análise preliminar da viabilidade

O dimensionamento dos sistemas de codigestão foi descrito no item 4.5, dessa maneira, tanto a codigestão de leite como a de lodo carregam em comum os mesmos equipamentos necessários, exceto o tamanho do biodigestor e do gasômetro que variam de acordo com a quantidade de resíduo gerado.

O biodigestor no sistema de codigestão 1 foi idealizado como sendo um tanque de polietileno no qual irá receber os 9.854,54 L de leite gerados diariamente. Devido ao

biodigestor proporcionar um tempo de detenção hidráulica de 3 dias, o volume final será de aproximadamente 30.000 L e poderá ser dividido em dois tanques de 15.000 L. A Figura 11 mostra o biodigestor idealizado.

Figura 11 - Biodigestor tanque de polietileno Fortplus



FONTE: Leroy Merlin (2019)

O biogás gerado passa por um sistema de limpeza para a remoção de suas impurezas. Esse sistema, poderá ser constituído de 3 cilindros de 15 L contendo limalhas de ferro para a remoção de H_2S (Figura 12).

Figura 12 - Cilindro suporte das limalhas de ferro



FONTE: Tebão suspensões (2019)

De acordo com Valente (2015), o gasômetro deve suportar 35% da vazão diária de biogás para garantir a rentabilidade da operação, ou seja, deve ocorrer o

armazenamento do biogás produzido nos momentos em que não é consumido, portanto, o gasômetro idealizado (Figura 13) será de 20 m³.

Figura 13 - Gasômetro de dupla membrana GS



FONTE: Valente (2015)

Um medidor de vazão também será utilizado, para medir a vazão de biogás gerado ao longo do dia. A vazão de gás proveniente do sistema 1 é de 39,6 L min⁻¹, por isso escolheu-se o equipamento ilustrado na Figura 14 que mede vazões até de 100 L min⁻¹.

Figura 14 - Medidor de vazão Omega



FONTE: Produtos Omega (2019)

O biogás gerado passa por uma unidade de compressão (Figura 15), com o objetivo de se garantir uma vazão adequada no sistema de cogeração (microturbina, moto-gerador, caldeira).

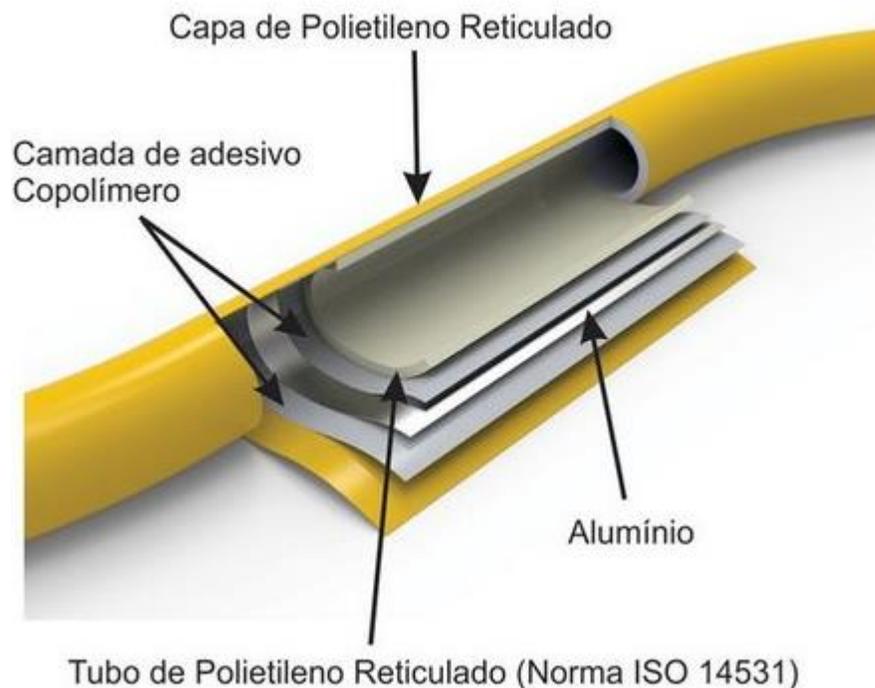
Figura 15 - Compressor de baixa pressão



FONTE: Loja do mecânico (2019)

Por fim, será utilizada uma tubulação de 100 m para o transporte do biogás. O tubo é composto de múltiplas camadas com 26 mm de diâmetro (Figura 16).

Figura 16 - Tubo Pex gás 26 mm múltiplas camadas



FONTE: Tudo house (2019)

A Tabela 15 resume os equipamentos que poderiam ser utilizados e os custos pertinentes, dessa forma, o investimento necessário para a implantação do sistema.

Tabela 15 - Investimento para implantação do sistema de codigestão 1

Equipamentos	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Biodigestor (15 m ³)	2	5.970,90	11.941,80
Cilindro (15 L)	3	550,00	1.650,00
Gasômetro (20 m ³)	1	108.804,40	108.804,40
Medidor de vazão	1	5.990,00	5.990,00
Compressor	1	2.411,89	2.411,89
Tubulação (m)	100	12,72	1.272,00
		TOTAL	132.070,09

FONTE: Autoria própria (2019)

O biodigestor do sistema de codigestão 2 foi idealizado como sendo de um tanque de 23.617 L, pois leva em consideração a geração diária de leite de descarte (10.000 L) e a geração diária de lodo (12.000 Kg, aproximadamente 13.617 L). Devido ao biodigestor proporcionar um tempo de detenção hidráulica de 3 dias, o volume final será de aproximadamente 71.000 L, que poderá ser dividido em 3 tanques de polietileno de 20.000 L e 1 de 15.000 L. A produção de biogás nesse sistema leva em consideração o volume de biogás diário produzido pelo leite (57 m³) adicionado ao volume de biogás diário produzido pelo lodo de laticínios (21,44 m³), totalizando 78,44 m³. Dessa forma, o gasômetro idealizado será de 28 m³. A Tabela 16 mostra os custos pertinentes para a implantação do sistema de codigestão 2.

Tabela 16 - Investimento para implantação do sistema de codigestão 2

Equipamentos	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Biodigestor (15 m ³)	1	5.970,90	5.970,90
Biodigestor (20 m ³)	3	9.500,00	28.500,00
Cilindro (15 L)	3	550,00	1.650,00
Gasômetro (28 m ³)	1	110.634,26	110.634,26
Medidor de vazão	1	5.990,00	5.990,00
Compressor	1	1.981,89	1.981,89
Tubulação (m)	100	12,72	1.272,00
		TOTAL	155.999,05

FONTE: Autoria própria (2019)

O PCI de acordo com teor de metano foi encontrado utilizando a Figura 10, onde considerou-se a condição de biogás de estações de tratamento de resíduos orgânicos contendo 60% de CH₄, desse modo, foi obtido o PCI de 6,0 kWh m⁻³ de biogás. Logo, o sistema de codigestão 1 tem capacidade de 342 kWh d⁻¹ e o sistema 2 capacidade de 470,64 kWh d⁻¹.

A indústria de laticínios pertence ao subgrupo A4 na modalidade tarifária azul da COPEL. A Figura 17, ilustra as tarifas praticadas para este subgrupo nos horários de ponta (3 horas ao dia, das 18:00 às 20:59:00 horas dos dias uteis) e fora de ponta (demais dias e horários) nas bandeiras tarifárias azul e vermelha.

Figura 17 - Quadro das tarifas praticadas ao subgrupo A4 pela COPEL

Subgrupo	Bandeira azul		Bandeira vermelha	
	Ponta	Fora	Ponta	Fora
	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/kWh
A4	0,51224	0,33929	0,55393	0,38098

FONTE: Adaptado de ANEEL (2019)

Com as tarifas definidas foi possível calcular as receitas anuais dos sistemas 1 e 2 nas condições de tarifação na bandeira azul e bandeira azul e vermelha (3 meses no ano), considerando o ano de 2019 como base de cálculo. Os resultados obtidos das receitas anuais são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Receitas anuais obtidas nos sistemas de codigestão

Receita	Sistema 1 (R\$)	Sistema 2 (R\$)
Bandeira Azul	44.238,94	60.878,99
Bandeira Azul e vermelha	108.666,90	183.077,60

FONTE: Autoria própria (2019)

Por fim, a Tabela 18 resume o tempo de retorno calculado pela Equação 8 para o investimento nos sistemas de codigestão 1 e 2, que produzirão o biogás em escala real conforme os investimentos ilustrados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 18 - Tempo de retorno do investimento em equipamentos

Sistema de codigestão	Produção de biogás (m ³ d ⁻¹)	Tempo de retorno	
		(comparativo a energia da COPEL) Bandeira Azul	(comparativo a energia da COPEL) Bandeira Azul e vermelha
1	57,00	3 anos e 5 meses	1 ano e 4 meses
2	78,44	2 anos e 5 meses	8 meses

FONTE: Autoria própria (2019)

O tempo de retorno obtido para os sistemas de codigestão são relativamente baixos, principalmente quando considerado a tarifação azul e vermelha. Neste sentido, os sistemas idealizados são economicamente viáveis quanto aos custos relacionados com os investimentos em equipamentos.

Porém, para sistemas de caldeira, observa-se que em tempos de crise econômica as indústrias estão utilizando como fonte de energia a biomassa na forma de cavacos a partir de serrarias, florestas e lenha. Assim, também foi verificada a análise econômica preliminar em comparação com cavacos de serraria de madeira de eucaliptos com umidade de 35 a 45% que são utilizados comumente no Brasil. A Tabela 19 apresenta os valores de PCI do biogás e do cavaco.

Tabela 19 - Valores de PCI do biogás e cavaco

Fonte	PCI	Unidade
Biogás (60% de teor de metano)	8.500	Kcal m ⁻³
Cavaco de eucalipto (35 - 40% de umidade)	2.000 - 2.400	Kcal Kg ⁻¹

FONTE: Nascimento (2007) e Lima & Passamani (2012)

A partir dos dados apresentados, a compatibilização do m³ do biogás é de aproximadamente 4,2 Kg de cavaco de eucalipto. A Tabela 20 apresenta o tempo de retorno do uso do biogás comparativamente ao uso do cavaco, levando-se em consideração que o valor da tonelada de cavaco em uma distância de aproximadamente 100 Km é de R\$140,00 (celulose on line, 2016).

Tabela 20 - Tempo de retorno do investimento comparado ao cavaco

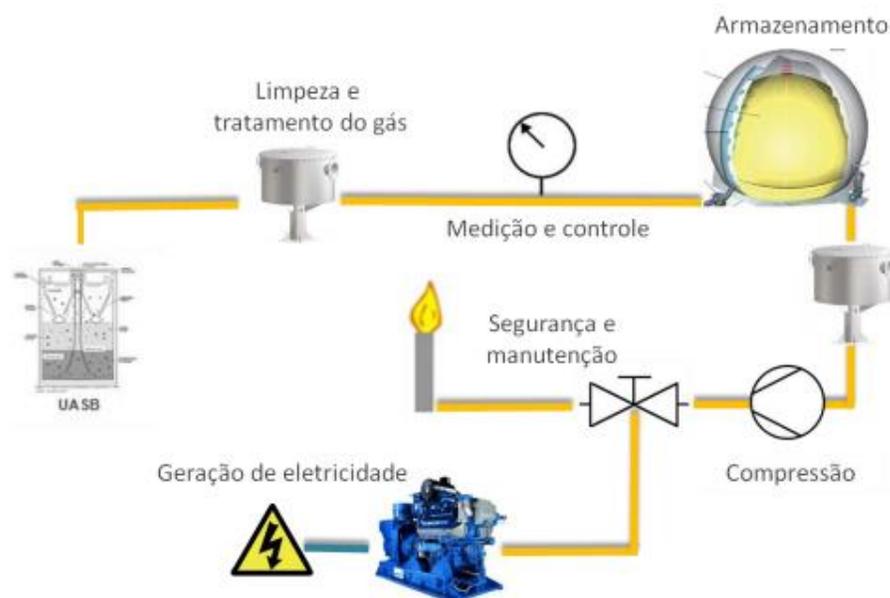
Sistema de codigestão	Produção de biogás (m ³ d ⁻¹)	Equivalência em cavaco (Kg d ⁻¹)	Receita anual (R\$)	Tempo de retorno em anos
1	57,00	239,40	12233,34	18
2	78,44	329,45	16834,79	14

FONTE: Autoria própria (2019)

A partir da avaliação do período de retorno, verifica-se que o cavaco é uma biomassa relativamente de baixo custo em comparação com a biomassa utilizada para geração de biogás quanto ao uso em caldeiras. Ressalta-se que a análise realizada não contabilizou equipamentos como forno e infraestrutura como armazenamento para o uso de cavacos. Fato que provavelmente reduzirá o tempo de retorno do biogás, porém, o uso de cavaco tende a ser mais interessante na análise econômica devido aos valores de tempo de retorno encontrados neste estudo, 18 e 14 anos para os sistemas codigestão 1 e 2, respectivamente.

Para o sistema da Figura 17 e com um fator de potência de 0,8 para moto geradores de biogás, determina-se um sistema de geração de energia de aproximadamente 25 Kva.

Figura 17 - Fluxograma das etapas de um sistema de aproveitamento do biogás com moto gerador



FONTE: Valente (2015)

Um moto gerador de 25 Kva tem como custo aproximadamente R\$ 35.000,00 (vide moto gerador de 30 Kva – Figura 18).

Figura 18 - Moto gerador de 30 Kva



FONTE: Grupo Gerador De Energia Toyama

Para a composição de custos do sistema com moto gerador, utilizou-se os dados de custos das Tabelas 15 e 16. A Tabela 21 apresenta os custos e os períodos de retorno para os sistemas de codigestão com a geração de energia por moto gerador.

Tabela 21 - Tempo de retorno do investimento comparado a tarifação de energia da COPEL

Sistema de codigestão	Investimento (R\$)	Tempo de retorno Bandeira azul	Tempo de retorno Bandeira azul e vermelha
1	167.070,09	4 anos e 6 meses	1 ano e 9 meses
2	190.999,05	3 anos e 6 meses	1 ano e 3 meses

FONTE: Autoria própria (2019)

Desta forma, pode-se concluir com a análise preliminar que o sistema mais viável financeiramente é o sistema alimentado com biogás por meio de moto gerador visando fornecer energia elétrica para o parque industrial do setor de laticínios.

6. CONCLUSÃO

O uso de biomassa para a geração de energia é uma forma importante de modificar o papel dos resíduos no sistema industrial visando proporcionar e agregar valor econômico e ambiental aos processos de tratamento de efluentes.

Assim, este trabalho teve como principais conclusões:

- Os resíduos utilizados neste trabalho como substrato possuem valores adequados de SV para tratamento por processos anaeróbios para gerar energia por vias de queima ou por moto gerador.
- O lodo de laticínios apresentou características ácidas para processos anaeróbios de tratamento, necessitando de misturas mais propícias para gerar resíduos de cogeração com pHs acima de 7,0, ou seja, com pH neutro.
- A produção de biogás durou poucos dias nos biodigestores devido ao acúmulo de AGV, reduzindo o pH do meio e inibindo a atividade dos microrganismos. Fato que denota a necessidade de inserção de alcalinizantes nos sistemas de bancada para estudos de geração de biogás.
- As misturas contidas nos biodigestores com as maiores frações de leite em relação ao lodo de laticínios, se mostraram com maior potencial para geração de biogás.
- O melhor índice de produtividade de biogás foi de $49,62 \text{ mL g}^{-1} \text{ SV}^{-1}$ iniciais no biodigestor 5 (contendo 11,3 mL de lodo de laticínios e 15,3 mL de leite de descarte). Este valor pode ser considerado baixo, indicando que o substrato ainda possui capacidade de produzir maiores volumes de biogás.
- O modelo matemático encontrado varia apenas em função do leite inserido no biodigestor. Porém, não representa estatisticamente a produção de biogás dos substratos utilizados.
- O tempo de retorno dos investimentos em equipamentos para a produção de biogás e queima em caldeira se mostrou baixo quando comparado com o uso de energia elétrica para este fim, porém, o uso de cavacos apresenta valores de viabilidade econômica melhores que o sistema de queima com biogás.

- O sistema de biogás para uso em moto gerador com geração de energia elétrica apresenta-se de forma promissora na análise econômica preliminar realizada neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, N. BOIVIN, S. **A review of biogas purification processes.** Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 3, n. 1, p. 42-71, 2009.
- ABREU, Fábio Viana. **Biogás: Economia, Regulação e Sustentabilidade.** Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 196 p.
- ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos.** 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CTG - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008
- APHA. AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- BARRERA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural.** São Paulo: Ícone, p. 11. 1993.
- BAZZO, E. **Geração de vapor.** [S.l.]: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- BEDUSCHI, L. C.; ORTOLANI A. F.; COAN, O. **Considerações gerais sobre a estação da UNESP de biogás automotivo a baixa pressão.** In II encontro sobre biogás automotivo - Coletânea dos trabalhos apresentados, EMBRATER, Serviço de extensão rural, EMBRATER/UNESP, Jaboticabal, 1985.
- BONA, F. S.; FILHO, E. R. **As microturbinas e a geração distribuída.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2004, Campinas. Anais. Campinas: UNICAMP, 10p.
- BRASIL. ANEEL. Resolução ANEEL nº 2.559 de 18 de junho de 2019. **Tarifas aplicadas à alta tensão.** Disponível em: <[https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela_tarifas/\\$FILE/Tabela%20tarifas.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela_tarifas/$FILE/Tabela%20tarifas.pdf)>. Acesso em: 20 de nov. de 2019.

- BRIÃO, V. B. **Estudo de prevenção à poluição em uma indústria de laticínios.** Maringá, 2000, 71 p. (Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá).
- BUCHAUER, K. 1998. **Comparison of two simple titration procedures to determine volatile fatty acids in influentes to waste-water and sludge treatment processes.** *Water SA.* v. 24, n. 1.
- CASSINI, S. T. **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás.** Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 196 p.
- CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; PECORA, V. **Biogás- Biocombustíveis ANP.** In: Carlos Augusto G. Perlingeiro. (Org.). *Biocombustíveis no Brasil - Fundamentos, Aplicações e Perspectivas.* C. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2014, v. 1, p. 136-167.
- CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H. J. **Biodigestores.** VI Semana de Tecnologia em Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, Paraná, Brasil, 2008.
- CHENG, C. **Energia alternativa na indústria láctea: a produção e aproveitamento do biogás em uma queijaria minhota.** FEUP, 2007.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológicos de águas residuárias: reatores anaeróbios.** 1 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1997.
- COLUSSE, G. A. **Produção do biogás a partir de glicerina e vinhaça para geração de biometano em escala laboratorial.** 2017. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Bioenergia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.
- COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** 2006. 194 f. Dissertação (Pós-Graduação em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- CROVADOR, M. I. C. **Potencial de geração de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.** 2014, 119 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2014.

- CVETKOVSKI, I.; LITONJUA, R. **Biogas: Production, Consumption, and Applications**. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, Inc, 2012.
- DALTRO, A. B. V.; RODRIGUES. **Simulação do procedimento de partida de uma turbina a gás em ciclo simples**. 2013. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- DEGANUTTI, R.; PALHACI, M.C.J.P; ROSSI, M.; TAVARES, R. **Biodigestores Rurais: Modelos Indiano, Chinês e Batelada**. Trabalho apresentado no AGRENER 2002. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, São Paulo, 2002.
- FAO. 2019. **Dairy Market Review**. March, 2019. Rome. Disponível em:<<http://www.fao.org/3/ca3879en/ca3879en.pdf>>. Acesso em: 02 de maio de 2019.
- FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – Estudo de caso**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel/ PR. 2012.
- FEAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE; FIEMG. FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Laticínios**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2014.
- FEAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE; FIEMG. FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS; GIZ. AGÊNCIA DE COOPERAÇÃO BRASIL ALEMANHA. **Guia Técnico Ambiental de Biogás na Agroindústria**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2015.
- FERRAZ, J. M. G.; MARRIEL, I. E. **Biogás; fonte alternativa de energia**. Sete Lagoas, EMBRAPA-CNPMS, 1980.
- FONTANELLE, M. N. **Tratamento de efluentes líquidos da indústria de laticínios de Minas Gerais**. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

- FORESTI, E. et al. **Fundamentos do trabalho anaeróbio**. In: Campos, J. R. (Coord.). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 29-52.
- FUKAYAMA, E. H. **Características Quantitativas e Qualitativas da Cama de Frango Sob Diferentes Reutilizações: Efeitos na Produção de Biogás e Biofertilizante**. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual Paulista. Pós-Graduação em Zootecnia. Jaboticabal, 2008.
- GADELHA, E. P. **Avaliação de inóculos metanogênicos na aceleração do processo de degradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**. 2005. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2005.
- GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedade Rurais com Ênfase na Agregação de Valor: Um Estudo de Caso na região de Toledo – PR**. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Estratégia Organizacional) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 2003.
- GOMES, V. **Leite de descarte: uma boa opção para alimentação de bezerras?** Milkpoint, 2018. Disponível em: <<https://www.milkpoint.com.br/colunas/viviane-gomes/leite-de-descarte-uma-boia-opcao-para-alimentacao-de-bezerras-207816/>>. Acesso em: 20 de nov. de 2019.
- HEBERLE, A. N. A. **Biogás gerado a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes suplementado com óleo vegetal residual**. 2013. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2013.
- HENARES, J. F. **Caracterização do efluente de laticínio: análise e proposta de tratamento**. 2015. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.
- JANK, M. S.; FARINA, E. M. M. Q.; GALAN, V. B. **O agrobusiness do leite no Brasil**. São Paulo: Milkbizz, 1999.
- JORGE, L. H. A.; OMENA, E. **Biodigestor**. Dossiê Técnico. SENAI/ AM- Escola SENAI Antônio Simões. Março, 2012.

- JUNIOR, A. T. F. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto.** Ilha Solteira, SP. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. 2008.
- KONDUSAMY, D.; KALAMDHAD, A. S. **Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 2, n. 3, p. 1821-1830, 2014.
- KUBASKÁ, M; SEDLÁČEK, S.; BODÍK, I; KISSOVÁ, B. **Food Waste as Biodegradable Substrates for Biogas Production.** In: 37th International Conference of SSCHE. Tatranské Matliare, Slovakia, 2010.
- KJELDSEN, P.; CHRISTENSEN, T. H. **Leaching test to evaluate pollution potencial of combustion residues from an iron recycling industry.** Waste Managment & Research, 8, 277-292, 1990.
- KRICH, K.; AUGENSTEIN, D.; BATMALE, J. P. et al. **Biomethane from dairy waste: A sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California.** Califórnia: Clear Concepts, 2005. 282p
- LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação da produção de biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES.** Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. 2012.
- LEITE BRASIL. **21º Ranking maiores empresas de laticínios do Brasil – 2017.** Disponível em:<<http://www.leitebrasil.org.br/download/maiores%20laticinios%202017.pdf> >. Acesso em: 02 de maio 2019.
- LEMA, J. M.; MENDEZ, R.; SOTO, M. **Tratamento de anaeróbios para o tratamento de efluentes líquidos.** In: Curso de digestão anaeróbia aplicada a resíduos sólidos e líquidos. Recife, 1997.
- LORA, E. E. S; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis.** Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 1.200 p.

- MACHADO, R. M. G.; FREIRE, V. H.; SILVA, P. C.; FIGUERÊDO, D. V.; FERREIRA, P. E. **Controle ambiental nas pequenas e médias indústrias de laticínios.** Projeto Minas Ambiente, Belo Horizonte, 224p., 2002.
- MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos.** 2009. 333 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- MAGANHA, M. F. B. **Guia técnico ambiental da indústria de produtos lácteos – Série P+L.** São Paulo: CETESB, 2008.
- MARKOU, G & GEORGAKAKIS, D. **Cultivation of filamentous cyanobacteria (bluegreen algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review.** Apple Energy, v. 88 p. 3389 - 3401, 2011.
- MAYER, M. C. **Estudo da influência de diferentes inóculos no tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos.** 2013. 70 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande/ PB, 2013.
- MENESES, E. L. **O uso de turbina a gás para geração de energia elétrica em plataformas.** 2011. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Construção Naval, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2011.
- MOREIRA, L. **Comparação entre os poluentes atmosféricos emitidos por uma caldeira flamotubular movida a gás natural e a óleo combustível BPF 2A.** Interações, Campo Grande, v. 23, n. 1, p.49-57, Não é um mês valido! 2012.
- NASCIMENTO, M. D. **OTIMIZAÇÃO DO USO DE LENHA E CAVACO DE MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA EM AGROINDÚSTRIA SEROPÉDICA.** Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas do Campus de Botucatu - UNESP Área de Concentração Energia na Agricultura. 2007.
- NIRENBERG, L. P.; FERREIRA, O. M. **Tratamento de águas residuárias de indústria de laticínios: eficiência e análise de modelos matemáticos do projeto da Nestlé.** Goiânia: Universidade Católica de Goiás, 2005.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão – A alternativa energética.** São Paulo: Nobel, 1986. 93p.

- NUVOLARI, Ariovaldo et al. Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.
- OLIVER, A. P. M. et al. **Manual de Treinamento em Biodigestão**. Salvador: Winrock, 2008. 23 p.
- PAINI, V. **Geração de biogás a partir da utilização de resíduos orgânicos da indústria alimentícia de candies**. 2017. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.
- PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento residencial da USP - estudo de caso**. 2006. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- PEREIRA, E. R.; DEMARCHI, J. J. A. A.; BUDIÑO, F. E. L. **Biodigestores - Tecnologia para o manejo de efluentes da pecuária**. 2009. Disponível em: <<http://www.iz.sp.gov.br/pdfs/1255981651.pdf>> Acesso em: 09 de junho de 2019.
- PIEROBON, L. R. P. **Sistema de geração de energia de baixo custo utilizando biogás proveniente de aterro sanitário**. 2007. 154 f. Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- POKRYWIECK, T. S. et al. **Avaliação do processo de tratamento de efluentes de laticínios**. 2013. Rev. Acad., Ciênc. Agrár. Ambient., Curitiba, v. 11, Supl. 1, p. S155-S161. Disponível em: <<https://periodicos.pucpr.br/index.php/cienciaanimal/article/view/11444/10781>>. Acesso em: 02 de maio de 2019.
- POL, L.H.; REBAC, S.; KATO, M.; LIER, J.C. and LETTINGA, G. **Anaerobic treatment of low-strength wastewater**. In: V Latin-American Workshop/Seminar Wastewater Anaerobic Treatment. Vinã del Mar / Chile. p.27-30. 1998.
- REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. Caruaru, 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

- RESENDE, J. C.; STOCK, L. A. **Crescimento e mudanças geográficas da produção de leite no Brasil entre 2002 e 2012**. Boletim CBLeite, nº 20. Embrapa Gado de Leite. Juiz de Fora: 2014.
- RIBAS, N. P.; HARTMANN, W.; MONARDES, H. G.; ANDRADE, U. V. C. **Sólidos totais do leite em amostras de tanque nos estados do Paraná, Santa Catarina e São Paulo**. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 33, n. 6, p. 2343 – 2350, 2004.
- RORATTO, Lucas. **Análise e Construção de um Biodigestor para Pequenas Propriedades Rurais**. Trabalho de Final de Curso, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Horizontina. Horizontina, 2014. Disponível em: <http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2014/Lucas_Roratto.pdf>. Acesso em: 02 de maio de 2019.
- SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- SALOMON, K. R; LORA E, E. S. **Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil**. Revista Biomassa e Energia, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.
- SANTOS, J. T. S.; SOUZA, D. F. S.; ABUD, A. K. S.; OLIVEIRA JUNIOR, A. M. **Feasibility estimation of biogas production from wastewater of the dairy industry in the state of Sergipe using modeling and simulation**. Exacta – EP, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 229-237, 2015.
- SILVA, G. B. **Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir de resíduo de leite**. Estágio Supervisionado do curso técnico em química do Centro Universitário Univates, 2015.
- SOTTI, G. **Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário**. 2014. 59 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

- SPEECE, R. E. **Anarobic biotecnology for industrial wastewaters**. Vanderbilt University. Published by Archae Press. United States of America, 1995.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**, 2. ed. Porto Alegre, UFRGS, 174 p. 1995.
- VELOSO, A. V.; SOUZA, W. L.; ARAUJO, P. M. M.; Sant'Anna, M. C. S.; ALMEIDA, K. T. C. A.; SILVA, I. P. **Análise Dimensional de um Biodigestor Piloto Baseado no Modelo Indiano Utilizando Resíduos Alimentares**. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 6., 2010, Campina Grande.
- VENTURINI, K. S.; SARCINELLI, M. F.; SILVA, L. C. **Processamento do leite**. Espírito Santo: Pró-reitoria de Extensão – Programa Institucional de Extensão, 2007.
- VILLA, R. D.; SILVA, M. R. A.; NOGUEIRA, R.F. P. **Potencial de aplicação do processo foto-fenton/ solar como pré-tratamento de efluente da indústria de laticínios**. Química Nova, v. 30, n. 8, p. 1799-1803, 2007.
- VDI 4630. **Fermentation of organic materials**. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. 92 p. Germany: Verein Deutscher Ingenieure – VDI, 2006.
- Wellinger, A. Lindeberg, A. 1999. **Biogas upgrading and utilization**. Task 24: energy from biological conversion of organic wastes, p:1–19.
- YADVIKA; SANTOSH; SREEKRISHNAN, T. R.; KOHLI, S.; RANA, V. **Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques – a review**. Bioresource Technology, Oxon, v. 95, n. 1, p. 1-10, 2004.
- ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - UNIOESTE, Cascavel, 2012.