

**Estudo preliminar da biodigestão de esterco bovino com soro de leite em sistema de
digestão em duplo estágio com purificação de biogás**

**A preliminary study of biodigestion of bovine manure with whey in the double-stage
digestion system with a biogas purification**

**Estudio preliminar de biodigestion de estiércol bovino con suero en el sistema de
digestión de doble etapa con purificación de biogás**

Recebido: 22/06/2020 | Revisado: 04/07/2020 | Aceito: 09/07/2020 | Publicado: 24/07/2020

Steve Angstrom dos Santos Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1655-3884>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: steveribeiro@hotmail.com

Alana Lopes Junho

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8880-6727>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: alana.junho@outlook.com

Regina Mambeli Barros

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3154-2956>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: remambeli@hotmail.com

Ivan Felipe Silva dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7172-2794>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: ivanfelipeceice@hotmail.com

Geraldo Lúcio Tiago Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2755-4316>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: gltiagofilho@gmail.com

Eruin Martuscelli

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7935-9742>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: eruin.ribeiro@gmail.com.br

João Victor Rocha de Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7075-528X>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: jvictor_rocha@yahoo.com.br

Resumo

Esse trabalho tem como objetivo analisar a geração de biogás a partir da digestão anaeróbia em duas etapas em três bateladas. O trabalho visou ao estudo comparativo da digestão anaeróbia de dejetos bovinos (primeira batelada) com a codigestão de dejetos bovinos com soro de leite diluído no soro de leite na proporção soro de leite:dejetos bovinos 15:60 (L:L) na segunda batelada e 5:60 (L:L) na terceira batelada, tendo sido em ambas, completado o restante com água. O biogás gerado permitiu o funcionamento de um motor de combustão interna. O digestor anaeróbio em duas etapas foi projetado para receber 60 litros de substrato em cada estágio, com tempo de retenção hidráulica de 45 dias, percentual de 8% de sólidos totais, utilizando um sistema eletrônico de controle de temperatura para $35^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e um misturador mecânico e dois biofiltros de purificação do biogás, para remoção de H_2S e CO_2 . Foram coletadas em cada batelada antes e após a digestão anaeróbia, uma amostra do conteúdo com 1500mL para análise físico-química de parâmetros pH, sólidos totais, fixos e voláteis, DBO, DQO e Nitrogênio total Kjeldahl. Como resultados qualitativos do biogás, a partir de substrato de dejetos bovinos, obteve-se a composição de 65% de metano, 8% de CO_2 e 5% de H_2S na primeira batelada (apenas com dejetos bovinos). Com o substrato composto por dejetos bovinos e soro de leite, na proporção de 5:60 (L:L) conduziu a melhores resultados no que concerne ao pH (6,27) e Nitrogênio total Kjeldahl (168mg/L).

Palavras-chave: Dejetos bovinos; Soro de leite; Digestão anaeróbia; Codigestão.

Abstract

This study aims to analyze the generation of biogas from anaerobic digestion in two stages in three batches. The study aimed at the comparative study of the anaerobic digestion of bovine manure (first batch) with the codigestion of bovine manure with whey diluted in whey in the proportion whey: bovine manure 15:60 (L: L) in the second batch and 5:60 (L: L) in the third batch, both having completed the rest with water. The biogas generated allowed the operation of an internal combustion engine. The anaerobic digester in two stages was designed to receive 60 liters of the substrate in each stage, with the hydraulic retention time of 45 days, 8% percentage of total solids, using an electronic temperature control system for $35^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

and a mixer mechanical and two biogas purification biofilters to remove H₂S and CO₂. In each batch, before and after anaerobic digestion, a 1500mL content sample was collected for physical-chemical analysis of pH parameters, total, fixed and volatile solids, BOD, COD, and Kjeldahl total nitrogen. As qualitative results of biogas, from bovine manure substrate, the composition of 65% methane, 8% CO₂ and 5% H₂S was obtained in the first batch (only with bovine manure). With the substrate composed of bovine manure and whey, in the proportion of 5:60 (L: L), it led to better results concerning pH (6.27) and Kjeldahl total nitrogen (168mg / L).

Keywords: Bovine manure; Whey; Anaerobic digestion; Codigestion.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo analizar la generación de biogás a partir de la digestión anaerobia en dos etapas en tres lotes. El trabajo tuvo como objetivo el estudio comparativo de la digestión anaerobia del estiércol bovino (primer lote) con la codigestión del estiércol bovino con suero diluido en suero en la proporción suero: estiércol bovino 15:60 (L: L) en el segundo lote y 5 : 60 (L: L) en el tercer lote, ambos habiendo completado el resto con agua. El biogás generado permitió la operación de un motor de combustión interna. El digester anaeróbico en dos etapas fue diseñado para recibir 60 litros de sustrato en cada etapa, con un tiempo de retención hidráulica de 45 días, 8% de porcentaje de sólidos totales, utilizando un sistema electrónico de control de temperatura para 35°C ± 5°C y un mezclador mecánico y dos biogás. biofiltros de purificación para eliminar H₂S y CO₂. En cada lote, antes y después de la digestión anaerobia, se recolectó una muestra de contenido de 1500 ml para el análisis físico-químico de los parámetros de pH, sólidos totales, fijos y volátiles, DBO, DQO y nitrógeno total de Kjeldahl. Como resultados cualitativos del biogás, a partir del sustrato de estiércol bovino, se obtuvo la composición de 65% de metano, 8% de CO₂ y 5% de H₂S en el primer lote (solo con estiércol bovino). Con el sustrato compuesto de estiércol bovino y suero de leche, en la proporción de 5:60 (L: L) condujo a mejores resultados con respecto al pH (6.27) y al nitrógeno total Kjeldahl (168mg / L).

Palabras clave: Ayuno bovino; Suero; Digestión anaeróbica; Codigestión.

1. Introdução

A busca por energias de fontes renováveis é importante frente a crescente escassez de recursos naturais. Dessa forma, os digestores anaeróbios se destacam pela facilidade de

montagem, operação e por utilizar resíduos que são fonte de recursos renováveis, passível de serem utilizados em diversas escalas de grandeza, desde pequeno até grande porte. Além do aproveitamento do biogás que possui o maior interesse para fins energéticos, o digestato também possui importância na agricultura, como fertilizante para o solo. Com isso a busca de alternativas que supram a necessidade e diversifiquem a matriz energética tem ganhado destaque no cenário atual, como por exemplo, a geração de biogás por meio do uso da biomassa. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020) o biogás de resíduos sólidos urbanos, resíduos animais e agroindustriais conta com 39 empreendimentos, com potência outorgada de 191321,80kW, que corresponde a 0,11% da matriz elétrica do país. O aproveitamento energético de biogás da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, além de consistir em uma alternativa para a ampliação de fontes renováveis de energia, também contribui para o tratamento e disposição final ambientalmente adequada de resíduos.

O biogás é produzido a partir de resíduos orgânicos como esterco de animais, lodo, fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e resíduos agrícolas, convertidos, por meio da digestão anaeróbia (DA) do substrato em digestato e em biogás rico em gás metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e gases-traço como gás sulfídrico (H₂S), hidrogênio, nitrogênio, entre outros (Pecora, 2006).

Segundo Santos et al. (2018), o Brasil possui grande potencial para a geração de energia a partir de biogás de matéria orgânica residual, com possibilidade de alcançar entre 4,5 e 6,9 GW em 2015, perspectiva de alimentação de mais de 180000 ônibus com o biogás gerado e subsequente redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) da ordem de 4,93% por ano. Desse total, o esterco bovino apresenta mais de 60% do potencial de produção de biogás no Brasil.

Segundo Magalhães (1986), os digestores anaeróbios podem operar de forma contínua ou descontínua (ou em batelada). O sistema de maneira contínua é aquele no qual o digestor pode ser diariamente reabastecido por resíduo orgânico sem que isso prejudique a formação do biogás, tal como vazamento ou entrada de oxigênio no digestor. O modo em batelada é aquele em que se realiza sua recarga de modo alternado, ou seja, é inserido uma determinada quantidade de material orgânico no digestor anaeróbio em períodos de tempo de detenção hidráulica (TDH). O substrato é degradado pelo TDH, produzindo o biogás e o digestato, passível de ser utilizado como biofertilizante e assim, inicia-se uma nova batelada. Haroim e Gonçalves (2003) estudaram a produção de biogás da DA de dejetos de bovinos criados em sistema de confinamento. Com um número de 100 cabeças foi produzido um volume de 118

m³ de biogás, que fez funcionar um grupo gerador de 15kVA, suprindo a necessidade com folga de boa parte dos equipamentos utilizados na propriedade rural.

Entretanto, conforme afirmam Fagbohunge et al. (2019), atualmente, o esterco de gado representa 45% da matéria-prima disponível para operação com DA, é uma matéria-prima de baixa energia, especialmente, a pasta e sua aplicação na digestão de monosubstrato está em declínio.

Além disso, um outro fator a ser mencionado consiste na indústria de laticínios, que gera resíduos sólidos, líquidos e emissões atmosféricas passíveis de impactar o meio ambiente e a saúde humana. Independentemente do tamanho e potencial poluidor da indústria, a legislação ambiental exige que todas as empresas tratem e disponham de forma ambientalmente adequada seus resíduos (Silva, 2011).

Magalhães et al. (2011) afirmam que cerca de 50% do soro de leite não é aproveitado na indústria de laticínios, gerando impactos ambientais relevantes, já que se trata de um resíduo com alto teor orgânico. O autor afirma que o soro de leite é aproximadamente cem vezes mais poluente que o esgoto doméstico, sendo a sua destinação correta uma necessidade na indústria de laticínios.

Entretanto, conforme descrevem Bertin et al. (2013), o soro de leite cru caracteriza-se por uma carga orgânica muito alta e baixa capacidade tampão, assim como é rico em açúcares facilmente degradáveis, principalmente lactose (Vivekanand et al., 2018), além de proteínas e lactato (Fagbohunge et al., 2019). Como consequência, o tratamento anaeróbio direto do soro de leite cru pode levar à rápida acidificação, resultando em inibição do processo e baixa produtividade do biogás (Bertin et al., 2013; Vivekanand et al., 2018). Desse modo, Bertin et al. (2013) preconizam que DA não é generalizada na indústria de laticínios porque além de normalmente exibir alto potencial de acidificação, ainda requer longos tempos de retenção hidráulica (TRHs), e devido à pequena escala e fragmentação das fábricas de laticínios.

Nesse sentido, a codigestão de resíduos objetivando melhorar a qualidade do substrato para aprimorar a produção e qualidade de biogás, vislumbra-se a possibilidade de utilização do resíduo de dejetos de bovino (que possui baixa relação carbono/nitrogênio, C/N) com soro de leite. A codigestão de dejetos de bovinos com soro de leite pode manter um pH favorável e melhorar a produção de biogás (Bertin et al., 2013). Fagbohunge et al. (2019) objetivaram realizar a codigestão de soro ácido, de alta energia de modo a permear a pasta alcalina do dejetos de bovino com alto teor de nutrientes, melhorando a viabilidade econômica da DA do substrato em reator anaeróbio de manta de lodo de fluxo ascendente particionado. De acordo

com os autores, o experimento foi conduzido para análise da fermentação do permeado de soro de leite e da dejetos de bovino, sendo que o máximo valor de concentração de metano (CH₄) foi obtido no regime de alimentação de 2: 1 (soro de leite: dejetos de bovino), utilizando-se um THR de 10 dias e uma taxa de carga orgânica de 6,25 gDQO /L.d. O valor do pH permaneceu estável no estudo de Fagbohunge et al. (2019), com um aumento no regime de alimentação de 1:1 para 3:1 (soro de leite: dejetos de bovino), com um valor máximo de 7,16.

Comino et al. (2012) realizaram vários ensaios de codigestão anaeróbia em que foram utilizadas diversas proporções alimentares de chorume bovino com soro de queijo, assim como não foram utilizados produtos químicos no controle do pH. De acordo com os autores, condições estáveis de produção de biogás foram alcançadas em 50% de ambas as biomassa na mistura.

Rico et al. (2015) desenvolveram um sistema de tratamento anaeróbio de alta carga, com reciclagem de efluentes para suplementação de alcalinidade, para codigestão do soro de queijo e esterco com TRH curto (2,2 dias) usando frações líquidas do esterco como cosubstratos. A operação do supracitado sistema com uma fração constante de soro de queijo a 60% permitiu uma operação estável a uma taxa de carregamento orgânico de 28,7 kgDQO/m³.d e TRH de 1,3 dias, com remoção de 95,1% de DQO e uma taxa volumétrica de produção de metano de 9,5 m³CH₄/m³.d.

Adicionalmente, conforme preconizaram Nathao et al. (2013), o processo de tratamento anaeróbio de dois estágios permite a seleção e o enriquecimento de diferentes bactérias e arqueas em cada digestor. Desse modo, aumenta a estabilidade de todo o processo, pois controla a fase de acidificação no primeiro digestor e impede a sobrecarga e/ou inibição da população metanogênica no segundo digestor. Por exemplo, Jiménez-Castro et al. (2020) avaliaram o potencial da digestão anaeróbia em dois estágios para biodigestão de resíduos de suco de laranja em substituição ao uso de outros pré-tratamentos. Conforme os autores, o sistema permitiu o aumento da concentração de metano (cerca de 60% em comparação com aproximadamente de 50%) e o volume (em 13%) relativamente à DA de um estágio.

O presente trabalho foi realizado com três bateladas do sistema tratamento anaeróbio de dois estágios com purificação de biogás, sendo a primeira batelada caracterizada pela utilização do substrato do esterco bovino diluído em água para DA em reator de duas etapas, a segunda batelada pela adição de soro de leite para diluição de dejetos de bovino em uma proporção e a terceira, na proporção de 1:1. Na terceira batelada, também foi verificado o uso do biogás produzido para alimentar o funcionamento de um motor. Objetivou-se analisar sob

as mesmas condições de temperatura e umidade, com proporção de Sólidos Totais (ST) de 8%, qual substrato apresentou a produção de biogás com maior porcentagem de metano. Também, avaliou-se qual substrato produziu um digestato de melhor qualidade para ser utilizado como fertilizante agrícola, com a adequada relação carbono/nitrogênio (C/N).

2. Metodologia

Conforme descrito em Pereira et al. (2018), há que se descrever a metodologia da pesquisa. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa exploratória, sendo que dentre os principais métodos exploratórios de pesquisa, destacam-se a pesquisa literária, realizada neste estudo. Foi efetuada a revisão bibliográfica em artigos científicos publicados em revistas especializadas no assunto de biodigestão e geração de energia, tanto de estudos de caso quanto de revisão de literatura (estado da arte), disponíveis no Science Direct® (<https://www.sciencedirect.com/>). Foi realizado durante uma semana (10/05 a 17/05) a pesquisa com as palavras-chave “anaerobic digestion”, “cattle manure” e “milk whey”. O método de abordagem foi o método dialético, que penetra o mundo dos fenômenos. E empregado em pesquisa quantitativa. Já há dados de pesquisa anteriores acerca do assunto, o objetivo foi confirmar uma hipótese os autores desejam aferir uma tendência de comportamento aplicado a um estudo de caso realizado com a biodigestão de dejetos de bovinos, com e sem soro de leite e as subseqüentes produções de biogás. Foi uma pesquisa experimental ao se construir um modelo reduzido de biodigestão. As técnicas de coleta e amostragem de substrato e digestato foram submetidos à pesquisa laboratorial e compreenderam o preconizado pelo American Public Health Associations (APHA), em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Como base do estudo ora apresentado, foi utilizado sobretudo Ribeiro *et al.* (2016; 2018), além de conceitos de Chernicharo (2007), Nuvolari (2011) e Jordão e Pessoa (2005).

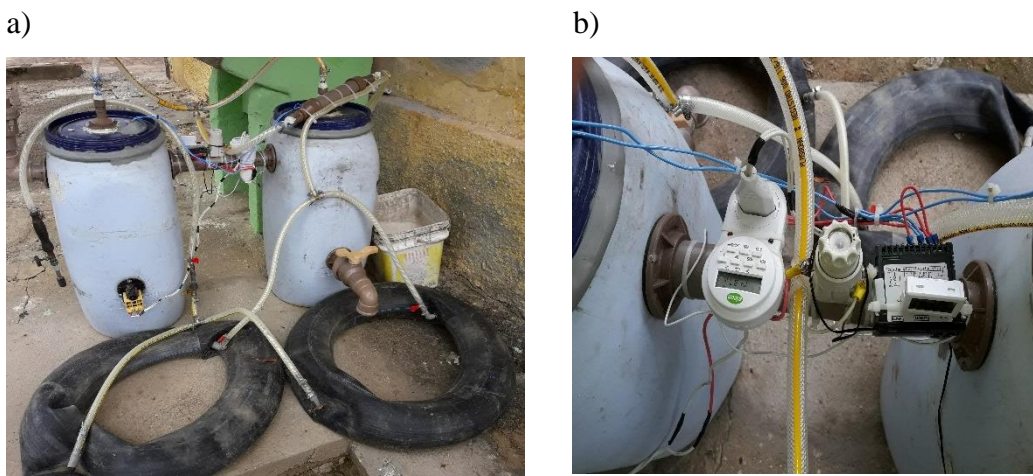
2.1. Montagem do sistema

Para o presente trabalho, adotou-se um sistema de digestores anaeróbios (de duplo estágio) do tipo batelada, cada um com volume de 60 litros, feito a partir de uma bombona de PVC de uso para acondicionamento de azeitonas que possui tampa roscada e parede de 5 mm de espessura (Figura 1a). Adotou-se um sistema automático para ajuste de temperatura para aquecimento do reator, por meio do uso de um controlador eletrônico da marca Coel® modelo

TLZ 11, normalmente utilizado em painéis de câmara de refrigeração (Figura 1b). O sistema de manutenção de temperatura foi configurado para manter o valor em $35^{\circ}\text{C}\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, ou seja, sua função é acionar o aquecedor quando a temperatura abaixar para $34,5^{\circ}\text{C}$ e desligá-lo quando o valor atingir $35,5^{\circ}\text{C}$, para manutenção da temperatura ótima para os microrganismos anaeróbios, conforme preconizaram autores como Chernicharo (2007), Nuvolari (2011), Jordão e Pessoa (2005) e Ribeiro *et al.* (2016; 2018).

Com a finalidade de manter o substrato sob o valor de temperatura de $35^{\circ}\text{C}\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ foi adaptado uma resistência tubular de piscina com potência de 12000 W e consumo médio de 10 A. Como a demanda de corrente elétrica é alta, foi instalado um sistema de proteção a fim de prevenir possíveis curtos circuitos, utilizando um fusível de base Diazed de 12 A da marca Siemens®. Foi instalado um disjuntor adicional Din de 10 A da marca Stek®, na eventualidade de falha do primeiro fusível. Para homogeneização de temperatura e visando a mistura completa do substrato no reator foi instalado na parte inferior do reator um motor elétrico com um agitador (Figura 1b). Foi instalado um relógio eletrônico para acionamento durante 5 minutos do sistema de agitação com periodicidade horária. A representação esquemática da energia elétrica usada no sistema é apresentada na Figura 2.

Figura 1: Sistema: **a)** de reator anaeróbico em duplo estágio com purificação de biogás (superior esquerda); e **b)** sistema de controle de temperatura e de agitação com relógio eletrônico (superior direita)

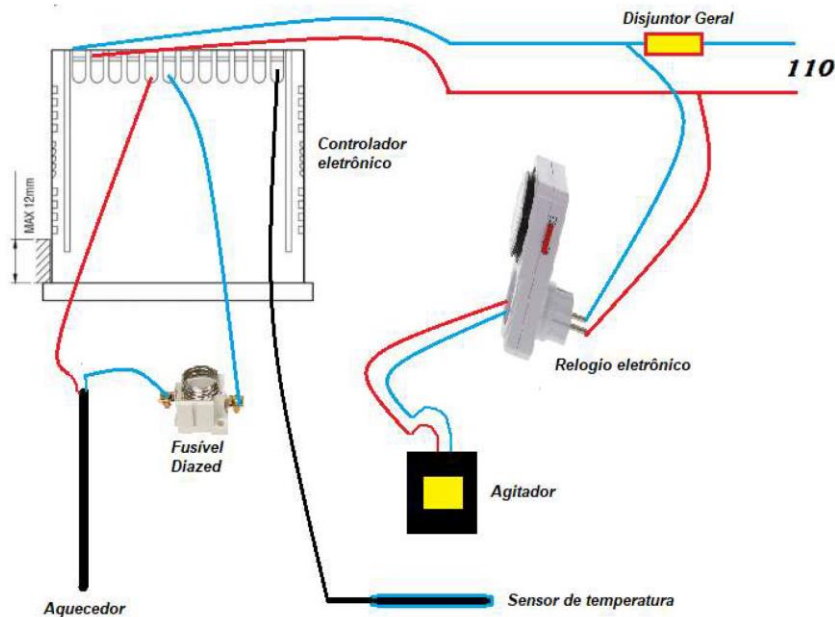


Fonte: Autores.

A Figura 1.a mostra os reatores anaeróbicos utilizado para o experimento, nele é possível identificar os dois tambores em que o substrato foi colocado e onde foi misturado,

nela também é possível verificar as duas câmaras de ar em que o gás produzido foi armazenado. A Figura 1.b mostra o motor elétrico, e os relógios utilizados para controlar o tempo de agitação do substrato dentro do tambor, também foi programado o intervalo de agitação de 5 minutos.

Figura 2: Representação esquemática da energia elétrica usada no sistema.



Fonte: Autores.

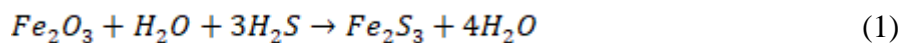
A Figura 2 mostra a representação esquemática da energia elétrica usada no sistema, é possível verificar que o sistema é abastecido por 110V, iniciando no disjuntor geral que controla o sistema caso haja sobretensão. Os equipamentos são definidos pelo controlador eletrônico que regula todo o sistema, o aquecedor que aquece o substrato, um fusível que protege da sobre corrente, um sensor de temperatura que mede a temperatura do substrato. Também é formado por um relógio eletrônico que controla o agitador, de intervalos pré-definidos de 5 minutos.

O sistema de duplo estágio de digestão anaeróbia foi instalado no Município de Maria da Fé-MG, Brasil, onde a temperatura durante o dia atinge cerca de 23°C e a noite pode chegar abaixo de 18°C. (Clima Tempo, s. d.). Desse modo, no período da noite o uso do aquecedor será mais exigido para que a temperatura se mantenha em $\pm 0,5^\circ\text{C}$, e o consumo de energia elétrica tende a aumentar. Portanto, o reator foi envolvido com uma camada de manta

asfáltica com cobertura de alumínio, uma camada de lã de vidro e finalmente, com uma camada de manta de lã sintética, com o objetivo de evitar a troca de calor com o meio.

É possível observar na Figura 1a, a instalação de uma câmara de ar de caminhão foi utilizada como reservatório de biogás para cada estágio do reator. Foi necessário efetuar a adaptação de mais um bico no reservatório, para que fosse separado a entrada e saída do biogás. O volume máximo medido da câmara foi de 1256 cm³.

Um sistema de purificação do biogás composto pela remoção do gás sulfídrico, do gás carbônico e umidade foi montado, por meio do uso de dois biofiltros. O primeiro (Figura 3a) foi o removedor de gás sulfídrico, feito a partir de um tubo de PVC de 300 mm de comprimento e diâmetro de 40 mm, com seu interior preenchido por pó de ferro fundido, microesferas de aço de baixo teor de carbono (utilizado como contrapeso de portões basculantes residenciais) e aparas de aço provenientes de tornos de usinagem. A remoção do gás sulfídrico se dá pela seguinte equação (1) onde o óxido de ferro e o gás sulfídrico em presença da umidade do biogás reagem, formando sulfeto férrico ou sulfato de ferro III e água.



O segundo biofiltro (Figura 3b), o removedor de gás carbônico e umidade, tem o objetivo de elevar o valor do poder calorífico inferior (PCI) do biogás, e foi feito a partir de um frasco de vidro transparente utilizado para armazenar Palmitos em conserva com volume de 5 litros. O frasco de vidro foi preenchido com uma solução filtrante composta por 3 litros de água e 60 gramas de Hidróxido de Sódio (NaOH) em grãos. Uma mangueira dentro da solução filtrante recebia o biogás já passado pelo primeiro biofiltro de remoção do gás sulfídrico. Dessa forma, o biogás inserido no fundo do frasco, quando em contato com a solução reage e forma carbonato de cálcio (CaCO₃), que se precipita no fundo do recipiente formando mais água. Com isso, conforme o biogás é filtrado, o volume da solução aumenta, sendo necessário a substituição do biofiltro.

Figura 3: Sistema de purificação de biogás: **a)** primeiro biofiltro para remoção de H_2S (esquerda); e **b)** segundo biofiltro para remoção de CO_2 (direita)



Fonte: Autores.

A Figura 3 mostra o sistema de purificação de biogás. A Figura 3.a indica um biofiltro aplicado logo após a saída do tanque em que mistura o substrato, que remove o gás H_2S . A Figura 3.b mostra um outro biofiltro aplicado após a saída do tanque para a remoção de CO_2 .

Depois de passar pelos dois filtros o biogás foi armazenado nas câmaras de ar e permaneceu lá até o ciclo completo da biodigestão.

2.2. Primeira batelada

Após a construção do biodigestor foi realizada uma nova recarga para funcionamento definitivo, com esterco bovino a 8% de Sólidos Totais (ST) conforme também estudaram Ribeiro *et al.* (2016). O sistema em batelada foi feito com um THR de 45 dias conforme a temperatura da localidade, de acordo com o sugerido por autores como Nuvolari (2011), Jordão e Pessoa (2005) e Chernicharo (2007).

2.3. Segunda batelada

No início do experimento, adotou-se também o esterco bovino puro diluído em água com 8% de ST conforme Ribeiro *et al.* (2016), para ser carregado no mesmo biodigestor utilizado na primeira fase, com aquecimento até temperatura controlada em $35^{\circ}C \pm 0,5^{\circ}C$ e agitação mecânica a cada uma hora durante cinco minutos. Foi coletada amostra do substrato

de 1500mL, para as mesmas análises físico-químicas mencionadas na primeira fase, antes e após a batelada. O TRH também foi o mesmo da fase anterior (45 dias).

A segunda batelada foi realizada nas mesmas condições anteriores, com exceção para o fato de que o esterco bovino invés de ser diluído em água para obter 8% de ST, foi diluído no soro de leite em uma mistura dejetado de bovino e soro de leite conforme preconizado por Bertin *et al.* (2013). Para o volume total do reator de 60 litros foi utilizado 15 litros de soro e completado o restante com água. De mesmo modo, amostras foram coletadas antes e após o período de TRH de 45 dias, assim como foi feito a medição da câmara para análise da composição do biogás.

2.4 Terceira batelada

Uma terceira e última batelada foi realizada nas mesmas condições de temperatura, agitação e TRH de 45 dias; inseriu-se primeiramente, 5 litros de soro de leite no reator e posteriormente, completou-se o restante do volume com esterco bovino fresco diluído em água à 8% de ST. Assim como as outras recargas, também foi coletada amostras de 1500 mL antes e depois da batelada e efetuou-se as medições da câmara para análise qualitativa do biogás.

2.5 Análise qualitativa do biogás

Na primeira batelada, uma amostra de 100 ml foi submetida ao analisador gases marca Instrutherm® modelo GEM5000 para a detecção de da composição do biogás.

2.6 Análises físico-químicas

Conforme supracitado, foram coletadas em cada batelada uma amostra do conteúdo com 1500mL para análise físico-química no Laboratório de Resíduos Sólidos, Hidrogeologia e Qualidade da Água da Universidade Federal de Itajubá (LABRES/UNIFEI) no início e final da batelada. As análises foram realizadas de acordo com a metodologia preconizada pela American Public Health Associations (APHA), em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Foram feitas as seguintes análises dos substratos afluente do efluente, após a biodigestão, conforme autores como Ribeiro *et al.* (2016; 2018):

- Sólidos Totais (ST) para determinar a concentração em mg/L de sólidos totais;
- Sólidos Totais Voláteis (STV) para determinar a concentração (em mg/L) de sólidos voláteis (fração orgânica);
- Nitrogênio para determinar a concentração, em mg/L, de nitrogênio;
- Demanda Química de Oxigênio (DQO), para determinar o oxigênio consumido para degradação química do material orgânico presente no substrato;
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), para definir o oxigênio consumido para degradação bioquímica do material orgânico presente no substrato; e
- potencial Hidrogeniônico (pH) foi feita de acordo com APHA (2002), utilizando-se do pHmetro marca Inolab® *Level 3*.

2.7 Aproveitamento energético em motor de combustão interna

No final do experimento foi adicionado um último teste no biodigestor, com o objetivo de viabilizar o comportamento do biogás utilizando-o como combustível em motores estacionários (Figura 4). O motor utilizado foi de 1/3 HP de 2 tempos da marca Búfalo® movido à gasolina. Para ser possível fazer com que o motor funcionasse com o biogás, foi preciso construir uma válvula mecânica que transferisse o biogás para o carburador do motor.

Figura 4: Sistema de reator anaeróbico em duplo estágio com purificação de biogás e uso como combustível em motores estacionários



Fonte: Autores.

Figura 4 mostra os dois reatores e o motor estacionário utilizado no experimento, o mesmo foi acionado e funcionou com o uso do biogás produzido pelos substratos.

3. Resultados e Discussões

3.1 Análises físico-químicas

3.1.1 Primeira batelada

Foi realizado a comparação das variáveis antes e depois das bateladas, como mostra a Tabela 1 em relação à primeira batelada.

Tabela 1: Análise físico-química do afluente e efluente da biodigestão em duplo estágio – primeira batelada

Parâmetro	Unidade	Afluente	Efluente	Remoção (%)
pH	adimensional	7,56	6,27	17%
Sólidos Totais (ST)	g/L	5,944	3,456	42%
Sólidos Fixos (SF)	g/L	1,783	1,12	37%
Sólidos Voláteis (SV)	g/L	4,1495	2,337	44%
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	11250	1119,33	90%
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	mg/L	3880	348	91%
Nitrogênio total Kjeldahl	mg/L	8,4	5,6	33%

Fonte: Autores.

Analisando em laboratório as amostras do afluente e efluente e observando os valores dos parâmetros físico-químicos análise, verificou-se que a redução de DBO foi de 90% e DQO, foi de 91%, o que mostra uma redução de carga orgânica bastante eficiente no sistema. A redução de ST, SF e SV foram de respectivamente, 42%, 37% e 44% . Houve redução no valor do pH em 17%; porém, em um valor não muito distante do neutro (pH=6,27). O valor de nitrogênio total Kjeldahl apresentou uma redução em sua concentração (33%).

3.1.2 Segunda batelada

Na segunda batelada, o esterco bovino acrescido de soro de leite, e nesta carga foi utilizado 15 litros de soro de leite com o intuito de diluir o esterco no próprio soro, e complementado o restante da diluição com água, com 8% de ST. Decorrido os 45 dias TRH, amostras foram coletadas para efetuar as análises físico-químicas, conforme indica a Tabela 2.

Tabela 2: Análise físico-química do afluente e efluente da biodigestão em duplo estágio – segunda batelada.

Parâmetro	Unidade	Afluente	Efluente	Remoção
pH	adimensional	3,5	4,31	-23%
Sólidos Totais (ST)	g/L	25,5833	7,080	72%
Sólidos Fixos (SF)	g/L	4,3322	2,41	44%
Sólidos Voláteis (SV)	g/L	21,2511	4,670	78%
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	9427	1838	81%
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	mg/L	6154,4	630	90%
Nitrogênio total Kjeldahl	mg/L	9,8	3,1	68%

Fonte: Autores.

Na segunda batelada, o meio ainda se iniciou (pH=3,5) e se manteve ácido após a biodegradação (pH=4,31); porém, elevando seu valor. Tal fato se deve a alta adição de soro de leite, rico em ácido láctico. A redução de ST, SF e SV foram de respectivamente, 72%, 44% e 78%. A redução de ST, SF e SV foram maiores que na primeira batelada. A redução de DQO e DBO foram de 90% e 81%, respectivamente.

A redução de DQO foi igual da primeira batelada e menor em relação à DBO () em relação à mesma. O valor de nitrogênio total Kjeldahl apresentou uma redução em sua concentração (68%), valor maior que na primeira batelada (33%).

3.1.3 Terceira batelada

A terceira batelada foi realizada ainda utilizando o soro de leite; no entanto, com proporções menores, primeiramente adicionou-se 5 litros de soro, o esterco bovino diluído em

água com 8% de ST foi adicionado até completar-se o volume total do digestor. Os dados das análises laboratoriais estão contidos na Tabela 3.

Tabela 3: Análise físico-química do afluente e efluente da biodigestão em duplo estágio – terceira batelada.

Parâmetro	Unidade	Afluente	Efluente	Remoção
pH	adimensional	7,56	6,27	17%
Sólidos Totais (ST)	g/L	6,0703	4,3838	28%
Sólidos Fixos (SF)	g/L	6,433	5,06	21%
Sólidos Voláteis (SV)	g/L	5,427	3,877	29%
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	26930	1752	93%
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	mg/L	14251	879,8	94%
Nitrogênio total Kjeldah	mg/L	168	168	0%

Fonte: Autores.

Observando os valores da Tabela 3, verifica-se que o pH reduziu em 17%; porém, manteve-se próximo a neutralidade (pH=6,27), o que favorece a população microbiana envolvida na digestão anaeróbia.

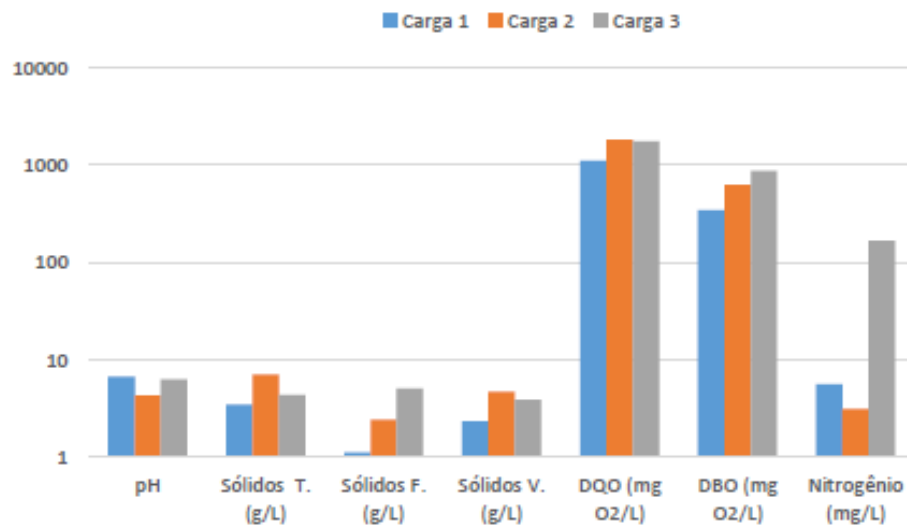
Houve uma significativa redução da DBO (94%) e DQO (93%), a maior em ambos parâmetros em todas as bateladas; no entanto, a redução dos sólidos A redução de ST, SF e SV foram de respectivamente, 28%, 21% e 29%. A redução de ST, SF e SV foram menores que na primeira e segunda bateladas.

O valor percentual de redução de Nitrogênio total Kjeldahl foi de 0%, ou seja, se manteve até o final dos 45 dias de TRH, com 168 mg/L. Levando em consideração o valor do pH e o Nitrogênio, o digestato mostrou potencial para uso como fertilizante agrícola.

Análises devem ser feitas para verificar se se enquadra com normas, resoluções e legislação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).

O gráfico da Figura 5 representa uma comparação dos efluentes das três bateladas.

Figura 5: Sistema de reator anaeróbico em duplo estágio com purificação de biogás e uso como combustível em motores estacionários.



Fonte: Autores.

De acordo com o gráfico da Figura 5, é possível destacar a grande diferença de valor de Nitrogênio total Kjeldahl da segunda batelada para as demais. A terceira batelada apresentou maior valor de Nitrogênio total Kjeldahl (168 mg/L). Em relação aos sólidos, primeira batelada se destacou, obtendo a maior redução dos ST (42%), SF (37%) e SV (44%), assim como efluentes com menores valores dos parâmetros, respectivamente de 3,456g/L, 1,12g/L e 2,337g/L.

O valor de pH se manteve próximo para a primeira e terceira bateladas (ambos efluentes com pH=6,27), sendo que a segunda batelada obteve o pH do efluente mais ácido (pH=4,31) de todas bateladas. A DQO foi a variável em que as reduções nas três bateladas mais se aproximaram, sendo a redução na primeira batelada de 90% ($DQO_{\text{efluente}}=1119,33\text{mg/L}$), na segunda de 81% ($DQO_{\text{efluente}}=1838\text{mg/L}$) e na terceira de 93% ($DQO_{\text{efluente}}=1752\text{mg/L}$). A diminuição do valor da DBO na primeira batelada de 91% ($DBO_{\text{efluente}}=348\text{mg/L}$), na segunda de 90% ($DBO_{\text{efluente}}=630\text{mg/L}$) e na terceira de 94% ($DBO_{\text{efluente}}=879,8\text{mg/L}$).

Observando os valores de DQO e DBO é possível verificar que há a necessidade de um polimento do efluente para atendimento à legislação vigente de, por exemplo, lançamento de efluentes tratados em corpos d'água. A Resolução CONAMA 430/2011 (CONAMA, 2011) determina uma remoção mínima de 60% de Demanda Bioquímica de Oxigênio

(DBO_{5,20}). A Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n.º 1, de 05 de Maio de 2008 (MINAS GERAIS, 2008) do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) determina um limite de DQO=180mg/l e DBO_{5,20}= 60mg/L, com remoção mínima de 75% de DBO_{5,20}. Verifica-se a remoção mínima; entretanto, sem atingir os valores mínimos de DQO e DBO_{5,20} para os efluentes. Isto reforça a necessidade de polimento do efluente por um tratamento complementar, a exemplo de um filtro biológico.

3.2 Análise do biogás

Na primeira batelada, a produção de biogás se mostrou satisfatória, ao final de 45 dias de batelada, as câmaras de ar já apresentavam boa resistência ao ser apertada (Figura 6a). Na segunda batelada, a análise tato visual do biogás foi feita, em que a câmara de ar foi facilmente apertada, sendo possível juntar as paredes das câmaras (Figura 6b). O volume de biogás gerado foi observado como bem inferior comparado com a primeira carga. A geração do biogás na terceira batelada já foi perceptível passados 25 dias após a carga do sistema e ao final dos 45 dias atingiu o maior volume comparado com as demais bateladas (Figura 6c). No final da biodegradação foi feita a análise tato visual, sendo que nesta batelada a câmara apresentou grande resistência ao aperto, sendo necessário grande aplicação de força para efetuar a compressão. Em outras palavras, não foi possível juntar as paredes da câmara devido a tamanha pressão interna. Como resultado qualitativo do biogás, foi obtido na primeira batelada, o resultado uma composição de 65% de metano (CH₄), 8% de dióxido de carbono (CO₂) e 5% de H₂S (gás sulfídrico).

Figura 6: Biogás produzido: **a)** primeira batelada (superior esquerda); **b)** segunda batelada (superior direita); e **c)** terceira batelada (inferior)



Fonte: Autores.

A Figura 6 mostra a análise tátil visual do biogás produzido, na Figura 6.a indica a primeira batelada com quantidade razoável, enquanto que a 6.b a segunda com menos ar e a 6.c com maior produção de biogás visualmente analisando.

3.3 Aproveitamento energético com motor de combustão interna

Depois de vários testes com o motor de 1/3 HP de 2 tempos da marca Búfalo® funcionando, verificou-se que o motor funcionava de modo mais eficiente no biogás quando estava aquecido. Desse modo, primeiramente fez-se a partida do motor com a gasolina por um período de 10 minutos em velocidade máxima para que este ficasse aquecido, e aos poucos a válvula mecânica foi-se fechando a entrada da gasolina e permitindo a entrada do biogás, até que o motor funcionasse 100% a biogás. Para que isso acontecesse, foi preciso pressionar a câmara de ar para conduzir o biogás até o motor, pois não foi feita a pressurização do mesmo em um cilindro de alta pressão. Deste modo, as duas câmaras cheias foram capazes de manter o motor em funcionamento por um período de 5 minutos em velocidade máxima.

Durante todas as bateladas feitas posteriormente no biodigestor (segunda e terceira bateladas), o processo de combustão do biogás no motor estacionário foi o mesmo para todos testes, isto é, a combustão no motor sempre se manteve próximo aos 5 minutos de

funcionamento em velocidade máxima. Em cada batelada, os biofiltros do sistema eram substituídos por novos para manter sempre a qualidade de pureza do biogás. Após todos os eventos de funcionamento do motor, não se percebeu nenhuma alteração no funcionamento mecânico no mesmo, em relação ao torque e rotação.

Mesmo toda tubulação do biodigestor sendo de 50 mm, concentrações superiores a 8% de ST causaram entupimento nas tubulações, dificultando a entrada e saída do dejetos, sendo preciso o uso de cabo de aço de 5 mm para aliviar novamente a tubulação. O controle de temperatura foi essencial para melhor produção de biogás, tendo sido a temperatura mantida em $35^{\circ}\text{C}\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

4. Considerações Finais

Com a realização deste trabalho, verificou-se por meio da primeira batelada dos digestores anaeróbios de duplo estágio que somente o esterco fresco sob as condições ideais de temperatura, agitação e o tempo ideal de retenção apresentou apenas 5,6mg/L de nitrogênio total Kjeldahl do efluente, assim como a segunda batelada, com valor de 3,1mg/L; porém, a terceira batelada apresentou valor de 168mg/L (com adição de 5 litros de soro de leite com esterco bovino diluído em água com 8% de ST adicionado até completar-se o volume total do sistema de digestor de duplo estágio). A segunda batelada não obteve resultados satisfatórios de pH, devido a quantidade maior de soro de leite utilizado, apresentando efluente com $\text{pH}=4,31$. Altas concentrações de ácido láctico presente no soro aumentam a acidez. A terceira batelada obteve resultados com relação ao pH efluente (6,27) e conforme supracitado Nitrogênio total Kjeldahl (168mg/L). O soro de leite utilizado em concentrações menores foi capaz de acelerar a degradação da matéria orgânica e manter constante o nível de nitrogênio. Dessa forma o biogás foi gerado em maiores proporções, o que é interessante para o aproveitamento energético do mesmo, assim como, o tempo de formação foi menor, tendo sido observado formação de biogás 25 dias após a carga.

De modo geral, conclui-se que a proporção ideal soro de leite: dejetos de suíno encontrada no presente estudo foi de 5:60 (L:L); no entanto, é interessante efetuar mais testes com mais variações de concentração para que aproxime de otimização da proporção de volume utilizado, sem que se prejudique a biodegradação.

Em suma, a utilização do soro de leite obteve ótimos resultados utilizando menores proporções, sendo sua aplicação atrativa em fazendas de criação de vacas leiteiras, onde a disponibilidade dos ambos resíduos são altas. Além disso, em tais fazendas, a utilização do

biodigestor pode ser aplicado para geração de energia elétrica para consumo próprio, destinando e tratando os resíduos de forma ambientalmente adequada. Ainda, em situações que a geração de energia ultrapassa as necessidades de uso, o proprietário pode vender o excedente de energia para a companhia elétrica da região, proporcionando um retorno de investimento ainda mais lucrativo.

Tem-se como sugestão de trabalhos futuros, a utilização de concentrações maiores e menores de soro de leite no dejetos bovino, a fim de verificar a sua contribuição para a produção de biogás. Também fica como sugestão a utilização de várias combinações de concentração de dejetos bovino e temperatura no reator, afim de encontrar maior produção de biogás.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa à Prof. Regina Mambeli Barros (PQ2, número do processo: 303805 / 2018- 0) e ao Prof. Geraldo Lúcio Tiago Filho. Agradecemos à Agência de Pesquisa e Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por conceder apoio financeiro (projeto PROCESSO N.: TEC - APQ-03080-18 “Estudo do potencial do prognóstico da mitigação de gases de efeito estufa no estado de Minas Gerais pela geração de energia elétrica pelo biogás a partir da digestão anaeróbica da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e do lodo da estação de tratamento de águas residuais ”). Os autores também agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) por conceder uma bolsa de doutorado a Ivan Felipe da Silva dos Santos.

Referências

American Public Health Association (APHA) (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 22th ed. Washington.

Bertin, L., Grilli, S., Spagni, A., Fava, F. (2013). Innovative two-stage anaerobic process for effective codigestion of cheese whey and cattle manure, *Bioresource Technology*, 128, 779-783, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.118>

Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. (2020). Matriz por fonte e combustível. Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em 12 de maio de 2020.

Cestonaro, T., Costa, M. S. S. M., Costa, L. A. M., Rozatti, M. A. T., Pereira, D. C., Lorin, H. E. F., Carneiro, L. J. (2015). The anaerobic co-digestion of sheep bedding and $\geq 50\%$ cattle manure increases biogas production and improves biofertilizer quality, *Waste Management*, 46(1): 612-8, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.040>.

Climatempo. (2020). Climatologia: Maria da Fé – MG. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/3849/mariadafe-mg>. Acesso em 15 de maio de 2020.

Comino, E., Riggio, V. A., Rosso, M.. (2012). Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey, *Bioresource Technology*, 114, 46-53, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.090>

Conselho Nacional de Meio Ambiente – Conama. (2011). Resolução no 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Diário Oficial da União nº 92, de 16/05/2011, pág. 89, Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res11/res43011.pdf>. Acesso em 15 maio 2020.

Fagbohunge, M. O., Onyeri, C. A., Semple, K. T. (2019). Co-fermentation of whey permeates and cattle slurry using a partitioned up-flow anaerobic digestion tank, *Energy*, 185, 567-572, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.051>

Hardoim, P. C., Gonçalves, A. D. M.A. (2003). Avaliação do potencial do emprego do biogás nos equipamentos utilizados em sistemas de produção de leite. Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras.

Jiménez-Castro, M. P., Buller, L. S., Zoffreo, A., Timko, M. T., Forster-Carneiro, T. (2020). Two-stage anaerobic digestion of orange peel without pre-treatment: Experimental evaluation and application to São Paulo state, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 104035, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104035>

Jordão, E. P., & Pessoa, C. A. (2005). Tratamento de esgotos domésticos. Rio de Janeiro: ABES, 4. ed., 932.

Magalhães, K. T., Dragone, G., Pereira, G. V. M., Oliveira, J. M., Domingues, L., Teixeira, J. A., Almeida e Silva, J. B., Schwan, R. F. (2011). Comparative study of the biochemical changes and volatile compound formations during the production of novel whey-based kefir beverages and traditional milk kefir, *Food Chemistry*, 126(1), 249-253, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.012>

Minas Gerais. Conselho Estadual de Política Ambiental -Copam. (2008). Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n.º 1, de 05 de Maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/processos/EFABF603/DeliberaNormativaConjuntaCOPAM-CERHno01-2008.pdf>. Acesso em 15 de maio de 2020.

Nathao, C., Sirisukpoka, U., & Pisutpaisal, N. (2013). Production of hydrogen and methane by one and two stage fermentation of food waste, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(35), 15764-15769, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.047>

Nuvolari, A. (Org.). (2011). Esgoto Sanitário: Coleta, Transporte, Tratamento e Reúso Agrícola, Ed. Blucher, 2 ed., 562 p., ISBN: 9788521205685

Pecora, V. (2006). Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto Residencial da USP- Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Pereira, A. S., et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.

Ribeiro, E. M., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., Santos, I. F. S., Sampaio, L. C., Santos, T. V., da Silva, F. G. B., Silva, A. P. M., Freitas, J. V. R. (2016). Power generation potential in pasture aviaries in Brazil in the context of a circular economy, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 18,153-163, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.10.009>

Ribeiro, E. M., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., Santos, I. F. S., Sampaio, L. C., Santos, T. V., Silva, F. G. B., Silva, A. P. M., Freitas, J. V.R. (2018). Feasibility of biogas and energy generation from poultry manure in Brazil, *Waste Management & Research*, 36(3), 221–235, <https://doi.org/10.1177/0734242X17751846>

Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J., Rico, J. L.. (2015). High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate, *Chemical Engineering Journal*, 262, 794-802, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.050>

Santos, I. F. S., Vieira, N. D. B., Nóbrega, L. G. B., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L.. (2018). Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement, *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 54-63, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>

Silva, D. J. P. da. (2011). Resíduos na indústria de laticínios. 21 f. Curso de Gestão Ambiental, Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

Vivekanand, V., Mulat, D. G., Eijsink, V. G. H., Horn, S. J. (2018). Synergistic effects of anaerobic co-digestion of whey, manure and fish ensilage, *Bioresource Technology*, 249, 35-41, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.169>

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Steve Angstrom dos Santos Ribeiro – 20%

Alana Lopes Junho – 20%

Regina Mambeli Barros – 20%

Ivan Felipe Silva dos Santos – 10%

Geraldo Lúcio Tiago Filho – 10%

Eruin Martuscelli – 10%

João Victor Rocha de Freitas – 10%