



**Universidade Federal do Tocantins
Campus Universitário de Gurupi Programa de
Pós-Graduação em Biotecnologia**

CAROLINE RIBEIRO TUNES

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE
EFLUENTES ORGÂNICOS EM REATOR UASB**

GURUPI - TO 2017



**Universidade Federal do Tocantins
Campus Universitário de Gurupi Programa de
Pós-Graduação em Biotecnologia**

CAROLINE RIBEIRO TUNES

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE EFLUENTES ORGÂNICOS EM REATOR UASB

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biotecnologia da Universidade Federal do Tocantins como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Biotecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Gessiel Newton Scheidt

GURUPI – TO 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

T926p Tunes, Caroline Ribeiro.
PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO
ANAERÓBICA DE EFLUENTES ORGÂNICOS EM REATOR UASB. /
Caroline Ribeiro Tunes. – Gurupi, TO, 2017.
73 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do
Tocantins – Câmpus Universitário de Gurupi - Curso de Pós-
Graduação (Mestrado) em Biotecnologia, 2017.
Orientador: Gessiel Newton Scheidt

1. Metanização. 2. Águas residuais . 3. Energia sustentável. 4.
Biorreator. I. Título

CDD 660.6

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA

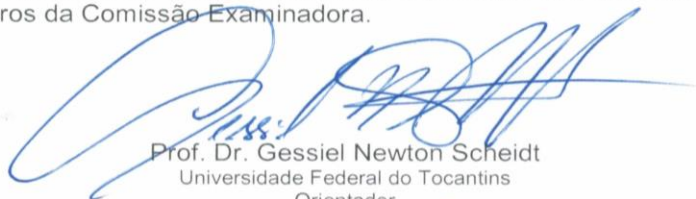
Rua Badejós, Chácaras 69 e 72 - CEP: 77402-970 - Caixa Postal 66 | Gurupi/TO
(63) 3311-3549 | www.uft.edu.br/biotecnologia | ppgbiotec@uft.edu.br



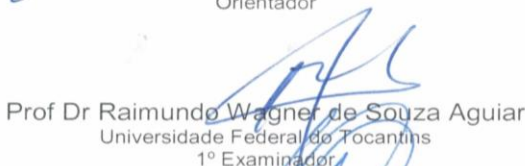
Ata de Defesa nº 22/2017

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CAROLINE RIBEIRO TUNES DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS.

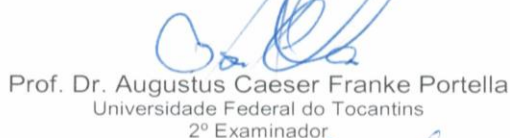
Aos 20 dias do mês de março do ano de 2017, às 08 horas, na sala 15, edifício BALA II, campus de Gurupi, da Universidade Federal do Tocantins, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Orientador Dr. GESSIEL NEWTON SCHEIDT da Universidade Federal do Tocantins, Prof. Dr. RAIMUNDO WAGNER DE SOUZA AGUIAR da Universidade Federal do Tocantins, Prof Dr AUGUSTUS CAESER FRANKE PORTELLA da Universidade Federal do Tocantins e Prof Dr ALOISIO FREITAS CHAGAS JUNIOR, da Universidade Federal do Tocantins, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CAROLINE RIBEIRO TUNES, intitulada "**Produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de fluentes orgânicos em reator UASB**". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo parecer favorável à aprovação, com as devidas correções apontadas pela banca, habilitando-a ao título de Mestre em Biotecnologia. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



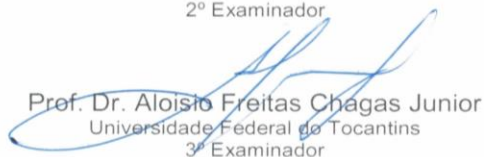
Prof. Dr. Gessiel Newton Scheidt
Universidade Federal do Tocantins
Orientador



Prof Dr Raimundo Wagner de Souza Aguiar
Universidade Federal do Tocantins
1º Examinador



Prof. Dr. Augustus Caesar Franke Portella
Universidade Federal do Tocantins
2º Examinador



Prof. Dr. Aloisio Freitas Chagas Junior
Universidade Federal do Tocantins
3º Examinador

Gurupi, 20 de março de 2017.



Prof. Dr. Gessiel Newton Scheidt
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Biotecnologia

Dedico aos meus amados pais, Márcia Divina Cardoso Ribeiro e Marcos Avelino Leite (in memoriam). As minhas irmãs Rafaela R. Tunes e Dyulle R. Tunes. Ao meu esposo Átila Reis da Silva pelo o amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me amar e ser o meu guia nessa jornada. Aos meus amados pais, Márcia e Marcos Avelino (*in memoriam*), por serem a base da minha vida e responsáveis por esta conquista. Á vocês todo o meu amor e agradecimento!

Às minhas amadas irmãs Rafaela e Dyulle, pelo amor e a amizade.

Ao meu amado esposo Átila Reis da Silva, pela compreensão, paciência, apoio e por ser o alicerce da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gessiel Newton Scheidt, pela ajuda e paciência.

Ao Prof. Dr. Wilson Leandro Mozena, pela oportunidade do estágio na Alemanha.

Aos meus professores na Alemanha Dr^a. Andrea Schüch e Dr. Nils Engler, pelo aprendizado e ajuda.

Aos meus queridos amigos e companheiros de laboratório UlriKe Klauß, Tom Lange e Robert, pelo carinho e amizade.

Aos amigos de curso pelo companheirismo e amizade nessa jornada.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para realização desse trabalho.

A Universidade Federal do Tocantins pela oportunidade de estudo e qualificação

A Capes, pela bolsa concedida.

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE EFLUENTES ORGÂNICOS EM REATOR UASB

RESUMO GERAL

Com a crescente demanda por energia renovável e proteção ambiental, a tecnologia de digestão anaeróbica para a produção de biogás tem atraído atenção considerável em torno do mundo. A digestão anaeróbica é um processo biológico que converte a matéria orgânica em um gás rico, o metano. É uma tecnologia bem estabelecida para o tratamento de resíduos e efluentes com alto conteúdo orgânico, provenientes de processos industriais e atividades domésticas. Neste estudo, a vinhaça, um subproduto da indústria sucroalcooleira e o efluente lácteo, subproduto da indústria de laticínios, foram avaliados para produção de biogás em reator UASB. Os efluentes orgânicos usados neste trabalho foram coletados a partir de indústrias de grande porte, localizadas no Brasil e Alemanha. Para a digestão anaeróbica da vinhaça e do efluente lácteo foi utilizado um reator do tipo UASB em escala laboratorial, temperatura mesofílica e com capacidade de 87 L. Para digestão da vinhaça, o reator UASB operou durante 15 dias, com COV de 2 Kg DQO $m^{-3} d^{-3}$ e TDH de 11,5 dias. Os resultados obtidos mostraram um bom funcionamento do reator UASB aplicado a vinhaça. Este estudo obteve-se uma eficiência de remoção de DQO de 71% e volume de biogás acumulado de 1160 litros com concentração de metano em torno de 48 a 57 %. Para a biodigestão do efluente lácteo, o reator UASB operou durante 51 dias. A eficiência do reator a partir da taxa de carga orgânica de 6 Kg COD $m^{-3} d^{-3}$ e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 11,8 foi estudada e seu desempenho foi avaliado pelo monitoramento do pH, DQO, relação de alcalinidade FOS/TAC e produção de biogás. Observou-se a eficiência de remoção de DQO em 71,3 %. O pH do reator foi verificado entre 7.0-7.3 e o valor de FOS/TAC entre 0,129-0,152. A produção média de biogás foi observada em 85,8 litros por dia, e o volume específico de biogás entre 0,46-0,71 L /g DQO por dia. O conteúdo de metano no biogás produzido, apresentou o valor máximo e mínimo em 56,6 % e 40 %, respectivamente.

Palavras-chave: metanização; águas residuais; energia sustentável; biorreator.

BIOGAS PRODUCTION FROM THE ANAEROBIC DIGESTION OF ORGANIC EFFLUENTS IN UASB REACTOR

ABSTRACT

With the rising demand for renewable energy and environmental protection, anaerobic digestion technology for biogas production has attracted considerable attention around the world. Anaerobic digestion is a biological process that converts organic matter into a methane rich gas. It is a well established technology for the treatment of waste and effluents with high organic content, from industrial processes and domestic activities. In this study, vinasse, a by-product of the sugar and alcohol industry and dairy effluent, a by-product of the dairy industry, were evaluated for biogas production in a UASB reactor. The organic effluents used in this work were collected from large industries located in Brazil and Germany. For the anaerobic digestion of the vinasse and the lactic effluent, a UASB reactor UASB was used in laboratory scale, with a mesophilic temperature and with a capacity of 87 L. For digestion of the vinasse, the UASB reactor operated for 15 days, with COV of 2 Kg COD m⁻³ d⁻³ and TDH of 11.5 days. The results obtained in this study showed a good functioning of the UASB reactor applied to vinasse. This study yielded a COD removal efficiency of 71% and an accumulated biogas volume of 1160 liters with a methane concentration of around 48 to 57%. For the digestion of dairy effluent, the UASB reactor operated for 51 days. The efficiency of the reactor from the organic loading rate of 6 kg COD m⁻³ d⁻³ and hydraulic holding time (TDH) of 11.8 was studied and its performance was evaluated by monitoring pH, COD, alkalinity ratio FOS / TAC and biogas production. The efficiency of COD removal was observed in 71.3%. The pH of the reactor was verified between 7.0-7.3 and the FOS / TAC value between 0.129-0.152. The average biogas production was observed at 85.8 liters per day, and the specific biogas volume was between 0.46-0.71 L / g COD per day. The methane content in the produced biogas, the maximum and minimum value was observed in 56.6% and 40%, respectively.

Keywords: methanization; wastewater; sustainable energy; bioreactor.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	13
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
CAPÍTULO 1	16
RESUMO	17
ABSTRACT	18
1 INTRODUÇÃO	19
2 PRODUÇÃO DE VINHAÇA	21
2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA VINHAÇA.....	22
2.2 O USO DE VINHAÇA DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL	23
3 PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA	24
3.1 ETAPAS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA.....	24
3.1.1 HIDRÓLISE.....	25
3.1.2 ACIDOGÊNESE	26
3.1.3 ACETOGÊNESE	27
3.1.4 METANOGÊNESE	27
3.2 FATORES QUE INTERFEREM NA DIGESTÃO ANAERÓBICA	28
4 REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE E DE MANTA DE LODO (UASB).....	29
4.1 CONFIGURAÇÃO E PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DO REATOR UASB	30
4.2 PARÂMETROS QUE INTERFEREM NA DIGESTÃO ANAERÓBICA EM REATORES UASB.....	32
5 BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB.....	32
5.1 PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO BRASIL A PARTIR DO USO DA VINHAÇA.....	34
6 CONCLUSÃO	37
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

CAPÍTULO 2	45
RESUMO	46
ABSTRACT	47
1 INTRODUÇÃO	48
2 MATERIAL E MÉTODOS	50
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS	50
2.2 CARACTERIZAÇÃO DA VINHAÇA.....	50
2.3 INÓCULO	51
2.4 REATOR UASB.....	51
2.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	52
2.6 MÉTODOS ANALÍTICOS	53
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1 ESTABILIDADE DO DIGESTOR	54
3.2 REMOÇÃO DE DQO	55
3.3 PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS	55
4 CONCLUSÃO	58
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
CAPÍTULO 3	62
RESUMO	63
ABSTRACT	64
1 INTRODUÇÃO	65
2 MATERIAL E MÉTODOS	67
2.1 MÉTODOS ANALÍTICOS	69
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4 CONCLUSÃO	72
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
CONCLUSÃO GERAL	75

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1. BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB

Tabela 1. Principais componentes da vinhaça de cana-de-açúcar.22

Tabela 2. Faixa de operação ótima dos principais parâmetros do processo de digestão anaeróbia.28

Tabela 3. Características físico-químicas da vinhaça - Usina São Martinho.....33

CAPÍTULO 2. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB

Tabela 1. Propriedades da vinhaça utilizada neste estudo.50

Tabela 2. Composição do biogás obtido da vinhaça utilizada.....56

CAPÍTULO 3. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE EFUENTES DE LATICÍNIOS EM REATOR UASB

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do substrato lácteo utilizado neste estudo.....67

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB

Figura 1. Fluxograma do processo de produção de etanol e subprodução de vinhaça de cana-de-açúcar. 19

Figura 2. Diagrama esquemático do processo de digestão anaeróbica23

Figura 3. Desenho esquemático de um reator UASB.....29

CAPÍTULO 2. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB

Figura 1. Reator UASB utilizado no experimento.49

Figura 2. Sacolas usadas para armazenamento de biogás em escala laboratorial.....51

Figura 3. A produção de biogás durante a digestão anaeróbia da vinhaça em reator UASB.56

CAPÍTULO 3. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE EFUENTES DE LATICÍNIOS EM REATOR UASB

Figura 1. Conteúdo de CH₄ no biogás produzido a partir de efluentes lácteos.69

1 INTRODUÇÃO GERAL

Promover a gestão adequada dos resíduos e efluentes gerados nos processos produtivos é um dos principais desafios enfrentados pela sociedade moderna. Dentre os diversos tipos de resíduos e efluentes gerados, aqueles com altos teores orgânicos têm se destacado como uma significativa fonte de contaminação ambiental, pois, quando não são tratados de forma adequada, poluem solo e corpos hídricos, proliferam vetores e doenças e emitem gases causadores do efeito estufa (INOVAGRID, 2017).

Neste contexto, a tecnologia de digestão anaeróbia, é um processo com ampla aplicabilidade para a conversão de resíduos e efluentes orgânicos em biogás, associando o tratamento adequado à uma fonte perpétua de energia renovável.

O biogás é um composto gasoso, constituído em média por 59% de gás metano (CH₄), 40% de gás carbônico (CO₂) e 1% de gases-traço, entre eles o gás sulfídrico (H₂S). O biogás resulta da degradação anaeróbia (em ausência de oxigênio) da matéria orgânica, realizada por colônias mistas de microrganismos. É considerado um recurso renovável porque faz parte do ciclo biogeoquímico do carbono (BLEY JR., 2015).

A tecnologia de digestão anaeróbia foi empregada com sucesso para remediar uma variedade de resíduos (NGUYEN, et al., 2015). O processo de biodigestão se desenvolve sobre resíduos rurais (esterco), agroindustriais (vinhaça, efluentes das indústrias de laticínios e dos matadouros), domésticos ou comunitários (lama de esgotos) e, também, sobre plantas (aguapé) (MALAJOVICH, 2012).

A digestão anaeróbica ocorre em inúmeros meios naturais, tais como pântanos, pode ser também reproduzida, se realizada com eficiência em espaços controlados, os chamados biodigestores: grandes recipientes dimensionados especialmente para digerir biomassas de diferentes origens (BLEY JR, 2015).

Além dos benefícios decorrentes do tratamento adequado dos resíduos de biogás, o efluente digerido, incluindo a matéria orgânica tratada, pode ser aplicado como fertilizante, reduzindo o uso de fertilizantes artificiais e reduzindo custos. Estes materiais também podem ser vendidos como um condicionador do solo ou mesmo como combustível sólido para a geração de calor (BRAMLEY et al., 2011).

Devido à sua versatilidade, o biogás pode ser considerado como uma fonte estratégica de energia, podendo se tornar um agente muito importante na ampliação da geração de energia elétrica distribuída no país, com base em fontes limpas e renováveis. Além disso, trata-se de uma fonte de energia estocável, podendo ser utilizada conforme a demanda (INOVAGRID, 2017).

Nesse sentido, este estudo buscou avaliar a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica aplicada a vinhaça de cana-de-açúcar e efluentes gerados na indústria de laticínios em reator do tipo UASB.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INOVAGRID. **Geração de energia com biogás**, 2017. Disponível em< www.inovagrid.com>. Acesso em: 8 jan. 2017.

BLEY JR., C. Biogás- A energia invisível. 2ª ed. **Revista e Ampliada**. São Paulo: CIBiogás: Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2015.

MALAJOVICH, M. A. **Biotecnologia 2011**. Edições da Biblioteca Max Feffer do Instituto de Tecnologia ORT. Rio de Janeiro, 2012.

NGUYEN, D.; GADHAMSHETTY, V.; NITAYAVARDHANA, S.; KHANAL, S. K. Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 193, p. 513–522, 2015.

BRAMLEY, J.; SHIH, J. C.; FOBI, L.; TEFERRA, A.; PETERSON, C.; WANG, R. Y.; RAINVILLE, L. Agricultural biogas in the united states- A market assessment. **Spring**. United States, 2011.

CAPÍTULO 1

BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB

BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB

RESUMO

Com a crescente demanda por energia renovável e proteção ambiental, a tecnologia de digestão anaeróbia de resíduos para a produção de biogás tem atraído atenção considerável dentro da comunidade científica. No Brasil, a produção de bioetanol gera grandes quantidades de vinhaça, que é um resíduo adequado para a produção de biogás. A vinhaça representa o principal subproduto da indústria sucroalcooleira por ser um efluente com alto teor poluente e gerado em grandes quantidades, o que agrava o problema de seu transporte e destinação final. Em virtude deste subproduto ser rico em nutrientes minerais e apresentar elevado teor de matéria orgânica, o seu principal destino no Brasil tem sido a sua aplicação em culturas de cana como fertilizante, uma prática conhecida como fertirrigação. No entanto, esta prática pode estar associada a futuros impactos ambientais. Neste cenário, a biodigestão anaeróbia da vinhaça em reatores UASB surge como uma alternativa de tratamento atraente para este resíduo. Este trabalho apresenta uma revisão abrangente da tecnologia de digestão anaeróbia para produção de biogás a partir da vinhaça. A revisão inclui uma discussão sobre o processo de digestão anaeróbia, vinhaça e reator UASB.

Palavras-chave: biodegradação anaeróbica; vinhaça de cana-de-açúcar; metano; reator anaeróbio.

ANAEROBIC BIODIGESTATION OF VINASSE IN UASB REACTOR

ABSTRACT

With the increasing demand for renewable energy and environmental protection, anaerobic digestion technology waste for biogas production has attracted considerable attention within the scientific community. In Brazil, ethanol production generates large amounts of vinasse, which is a suitable waste for biogas production. The vinasse is the main by-product of sugar industry to be an effluent with high pollutant content and generated in large quantities, which aggravates the problem of transport and final disposal. . By virtue of this by-product to be rich in nutrients and present high content of organic matter, its main destination in Brazil has been its application in sugarcane crops as fertilizer, a practice known as fertigation. However, this practice may be associated with future environmental impact. In this scenario, the anaerobic digestion of vinasse in UASB reactors appears as an attractive treatment alternative to this residue. This paper presents a comprehensive review of anaerobic digestion technology for biogas production from vinasse. The review includes a discussion of the process of anaerobic digestion, vinasse and UASB reactor.

Keywords: anaerobic biodegradation; sugarcane vinasse; methane; anaerobic reactor.

1 INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais decorrentes do uso abusivo de combustíveis fósseis e suas reservas finitas, impulsionam a busca por fontes de energias renováveis (CARRILLO-REYES *et al.*, 2014). A produção de biogás a partir de resíduos orgânicos é uma das mais socioeconômicas biotecnologias para a produção de energia renovável (TRIOLO *et al.*, 2012). A digestão anaeróbia de resíduos de usinas de cana-de-açúcar apresenta grande potencial de geração de energia.

No Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada em larga escala para a produção de álcool como combustível automotivo. O álcool é o único produto, porém, há geração de uma grande quantidade de gases (CO₂) e subprodutos líquido (vinhaça) e sólido (bagaço), que atualmente têm um valor muito pequeno ou mesmo negativo e, ainda não estão sendo adequadamente tratados, especialmente do ponto de vista energético (VAN HAANDEL, 2005; MACEDO, 2007). Com base na quantidade de cana processada durante a temporada 2013-2014 (653 × 10⁶ toneladas de cana), a geração de 91 × 10⁶ toneladas de palha (base seca), 169 × 10⁶ toneladas de bagaço (base úmida), 22 × 10⁶ toneladas de torta de filtro (base úmida) e 286-678 × 10⁶ m³ de vinhaça são estimados (UNICA, 2015; JANKE *et al.*, 2015).

A vinhaça é considerada o principal resíduo líquido da produção de etanol. Para cada litro de etanol, cerca de 15 litros de vinhaça é gerado (VAN HAANDEL, 2005). Este resíduo é derivado da etapa de destilação de etanol, deixando as colunas, a uma temperatura na gama de 85-90 °C (FERREIRA, 2011).

A vinhaça é caracterizada como um efluente com enorme potencial poluente, contendo uma elevada concentração de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), baixo pH e concentrações elevadas de compostos de baixo peso molecular, tais como álcoois, açúcar, potássio, cloreto e sulfato (DOWD *et al.*, 1994; DOELSH *et al.*, 2009). Devido as suas características físico-químicas, a vinhaça é geralmente utilizada como fertilizante, apresentando algumas vantagens em termos de crescimento e produtividade da cana (SYDNEY *et al.*, 2014). No entanto, a sua eliminação direta no ambiente pode poluir o solo e as águas subterrâneas devido ao seu

alto teor de matéria orgânica e de sólidos dissolvidos que são tóxicos ou poderiam ser contaminantes sob certas condições (PRASAD et al., 2008).

Neste cenário, as indústrias sucroalcooleiras buscam por alternativas mais racionais e sustentáveis para o uso e disposição final da vinhaça. Em virtude dos grandes volumes de vinhaça produzida, sua elevada carga orgânica e o elevado potencial poluente, o tratamento biológico é a alternativa mais adequada, especialmente a digestão anaeróbia, que combina a simplicidade, baixo consumo de energia, baixa produção de sólidos, geração de biogás e redução de poluentes orgânicos (WILKIE et al., 2000; VAN HAANDEL, 2005).

O processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça consiste na biodegradação de sua carga orgânica. Este processo gera biogás e biofertilizante com reduzida carga orgânica sem, no entanto, alterar suas propriedades fertilizantes (LAMONICA, 2006). Contudo, apesar de ser considerada uma estratégia promissora, antes de ser implementado em larga escala, o processo de digestão anaeróbia deve ser cuidadosamente avaliado, especialmente em relação às características dos substratos, como matéria orgânica e valor nutricional, macronutrientes, elementos traços e produção específica de biogás. Esses parâmetros influenciam diretamente alguns outros parâmetros importantes do processo tais como o pH, a acumulação de inibidores potenciais, macronutrientes, deficiências de elementos traços e também as taxas de degradação (JANKE et al., 2015).

A digestão anaeróbica da vinhaça só se tornou atraente a partir do desenvolvimento de reatores de alto desempenho tais como o reator anaeróbio de fluxo ascendente e de manta de modo (UASB), que são os mais adaptados a vinhaça (VON SPERLING, 2005). O reator UASB é o digestor anaeróbico mais popular e tem sido utilizado para o tratamento de muitos tipos de efluentes industriais, devido à sua elevada capacidade de tratamento em comparação com outros sistemas (ESPAÑA-GAMBOA et al., 2012).

O objetivo deste trabalho é fornecer uma revisão bibliográfica sobre a digestão anaeróbica da vinhaça em reatores do tipo UASB, visto que a vinhaça contém matéria orgânica facilmente digerível, sendo um potencial substrato para a geração de energia através do biogás, além de promover a estabilização da matéria orgânica.

2 PRODUÇÃO DE VINHAÇA

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) do mundo e o segundo produtor mundial de etanol, sendo responsável por 20% da produção mundial e 20% das exportações mundiais (UNICA, 2015). No entanto, se por um lado a atividade sucroalcooleira faz com que o Brasil ocupe uma posição de destaque mundial com relação à produção de açúcar e etanol, por outro, tal atividade produz grandes quantidades de resíduos, e destes resíduos, a vinhaça é o mais preocupante (ROLIM, 2013).

A vinhaça é removida das unidades de destilação de etanol (Figura 1) e representa um problema para o setor sucroalcooleiro devido às grandes quantidades produzidas (12-15 litros por litro de álcool produzido) e o seu alto teor poluente, principalmente devido à sua alta concentração de matéria orgânica recalcitrante (PRADO et al., 2013; SYDNEY et al., 2014; COLIN et al., 2016).

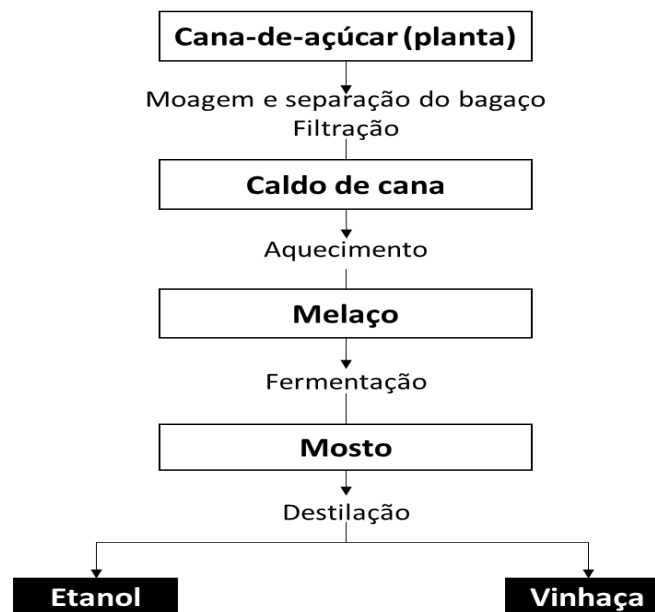


Figura 1. Fluxograma do processo de produção de etanol e subprodução de vinhaça de cana-de-açúcar (CHRISTOFOLETTI et al., 2013).

A safra 2012/2013 no Brasil produziu aproximadamente 26 bilhões de litros de etanol e 312 bilhões de litros de vinhaça (JÚNIOR et al., 2014). A vinhaça é também

produzida em muitos países como o subproduto da produção de etanol, porém a partir outras matérias-primas, tais como: beterraba, vinho e frutas na Europa, milho e tequila na América do Norte (GIANCHINI; FERRAZ, 2009; ESPAÑA-GAMBOA et al., 2011).

2.1 Composição química da Vinhaça

A vinhaça representa uma mistura de água, compostos orgânicos e inorgânicos (BAEZ-SMITH, 2006). Sua composição química varia de acordo com as características do solo, a variedade de cana-de-açúcar, o período da colheita, o substrato de fermentação (suco de cana e/ ou melaço) e o processo industrial utilizado para a produção de etanol (SALOMON; LORA, 2009).

A vinhaça tem uma cor marrom claro com um teor de sólidos de 20.000 a 40.000 mg / l, quando obtidos a partir de caldo de cana e uma cor preta-avermelhada com sólidos totais que variam de 50.000 a 100.000 mg / l, quando obtidos a partir de melaço de cana. Além disso, a vinhaça é um líquido ácido com pH entre 4 e 5 e o conteúdo de oxigênio com elevada DQO) (BAEZ-SMITH, 2006). Os sólidos inorgânicos contêm quantidades consideráveis de nutrientes, tais como fósforo, nitrogênio e potássio (Tabela 1). Sendo potássio o elemento mineral mais importante para o uso agrícola do resíduo (PRADO et al., 2013).

Tabela 1. Principais componentes da vinhaça de cana-de-açúcar.

Componente	Concentração
Água (%)	95-97
DBO ^a (mg/L)	5.000 – 100.000
DQO ^b (mg/L)	10.000 – 210.000
Glicerol (mL/L)	2,5 – 250
Etanol (mL/L)	0,1 – 120
Potássio (K ⁺) (mg/L)	800 – 6.500
Sulfato (SO ₄ ⁻) (mg/L)	700 – 3.000
Cálcio (Ca ²⁺) (mg/L)	70 – 1.100
Nitrogênio (N) (mg/L)	90 – 900

Magnésio (Mg ²⁺) (mg/L)	20 – 450
Fósforo (P ⁴⁺) (mg/L)	20 – 200

^a DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio; ^b DQO: Demanda Química de Oxigênio.

Fonte: BARROS et al., 2010; ZOLIN et al., 2011.

2.2 O uso de vinhaça de cana-de-açúcar no Brasil

Em consequência de suas características e custo relativamente baixo, durante décadas o principal destino da vinhaça no Brasil tem sido a sua aplicação em culturas de cana como fertilizante, uma prática conhecida como fertirrigação (MORAES et al., 2015).

De uma perspectiva econômica, a fertirrigação representa a solução de menor custo e mais simples de descarte da vinhaça, além de resultar em vários benefícios agronômicos, em termos de crescimento e produtividade da cana, devido ao alto teor de matéria orgânica e nutrientes (principalmente potássio, mas também nitrogênio e fósforo) presentes na vinhaça (SYDNEY et al., 2014). Na literatura, inúmeros estudos comprovam os resultados positivos obtidos na produtividade agrícola, associados à economia na aquisição dos adubos minerais e reduzindo a poluição do lençol freático, quando a vinhaça é disposta em doses recomendadas (LAIME et al., 2011).

Na fertirrigação, no entanto, existem controvérsias relacionadas ao seu impacto para o solo e águas subterrâneas, porque esta disposição acontece ocasionalmente diluída e de forma difusa, embora em grandes áreas de cultivo. Estudos têm apontado que o principal impacto causado pela infiltração da vinhaça no solo é o endurecimento do solo, acidificação do solo, salinização e crescente concentração de sais inorgânicos e carbono orgânico (PEREIRA, 2008). No entanto, fertirrigação tem sido a forma mais comum de disposição de grandes quantidades de vinhaça, devido à facilidade e economia para as usinas.

Os potenciais impactos ambientais a partir da prática de fertirrigação e o descarte indiscriminado da vinhaça foi um incentivo para pesquisas com o objetivo de encontrar aplicações mais racionais para este resíduo. Diferentes opções têm sido tentadas ou propostas para utilizar a vinhaça, porém o tratamento de digestão anaeróbica destaca-se como a tecnologia mais adequada para este tipo de resíduo.

A digestão anaeróbica reduz o potencial poluidor da vinhaça, através da

biodegradação de sua matéria orgânica e, ao mesmo tempo, tem o potencial de geração de energia através do biogás (metano). Dessa forma, a aplicação no solo direta da vinhaça pode representar uma perda de energia. Além disso, o excesso de matéria orgânica no solo pode ter impactos ambientais.

3 PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA

A digestão anaeróbica consiste de um conjunto de processos metabólicos complexos e sequenciais que ocorrem na ausência de oxigênio molecular e dependem da atividade de grupos de micro-organismos para promover a fermentação estável da matéria orgânica principalmente em metano e gases de dióxido de carbono. (MADSEN, et al., 2011).

O processo de digestão anaeróbia ocorre em inúmeros meios naturais e em espaços controlados como biodigestores anaeróbios (CHERNICHARO, 1997). Segundo Malajovich (2012), a biodigestão se desenvolve sobre resíduos rurais (esterco), agroindustriais (vinhaça, efluentes das indústrias de laticínios e dos matadouros), domésticos ou comunitários (lama de esgotos).

O biogás pode ser usado diretamente ou armazenado. Entre as aplicações possíveis está o abastecimento do consumo doméstico (fogões, lampiões ou aquecedores), a geração de energia elétrica e o acionamento de motores de veículos. Da biodigestão, restam dois resíduos. Um deles é um material sólido fibroso que, uma vez compostado e prensado, se usa como “solo artificial” para o cultivo de plantas ou para melhorar a qualidade do solo. O outro é um efluente líquido, que se aproveita como adubo (biofertilizante) (MALAJOVICH, 2012).

3.1 Etapas do processo de digestão anaeróbica

A digestão anaeróbia da matéria orgânica ocorre em quatro etapas microbianas, denominadas como: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 2). Há um consórcio de micro-organismos (bactérias acidogênicas, bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas, etc.) que são responsáveis por cada fase do processo e que

devem estar em perfeito equilíbrio dentro do sistema para a produção de biogás a partir de materiais orgânicos (KOTHARI, et al., 2014).

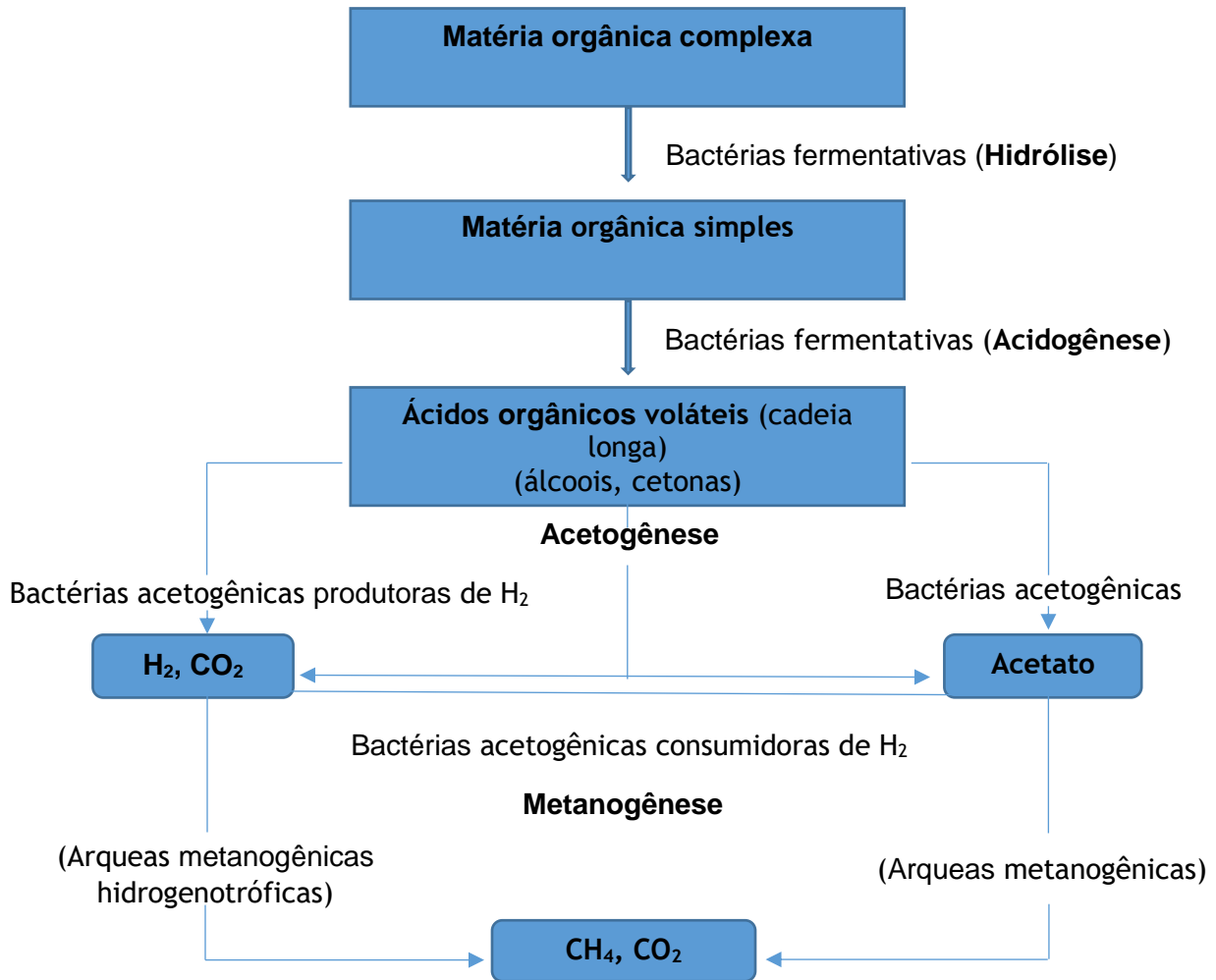


Figura 2. Diagrama esquemático do processo de digestão anaeróbica (MORAES et al., 2015, adaptado pela autora).

3.1.1 Hidrólise

A primeira etapa na digestão anaeróbia é a hidrólise dos polímeros de cadeia longa, realizada pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Como as bactérias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, ocorre a hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros) em materiais dissolvidos mais simples (moléculas

menores). Os principais compostos a serem hidrolisados são a celulose, as proteínas e os lipídios (SILVA, 2014). A hidrólise destes polímeros complexos, alguns dos quais são insolúveis, é catalisada por enzimas extracelulares que são excretadas pelas bactérias fermentativas, tais como proteases e lipases (BATSTONE, JENSEN, 2011).

Múltiplos fatores influenciam na taxa de hidrólise do substrato, como temperatura operacional do reator, tempo de residência e composição do substrato, tamanho das partículas, pH do meio e, até mesmo, a concentração de ácidos orgânicos voláteis provenientes da hidrólise (CHERNICHARO, 2006). As bactérias fermentativas hidrolíticas se constituem numa grande mistura de espécies, muitas são anaeróbias estritas, como as do gênero *Clostridium*, e algumas são facultativas, como as do gênero *Citrobacter*, *Enterobacter* e *Escherichia* (SILVA, 2014).

3.1.2 Acidogênese

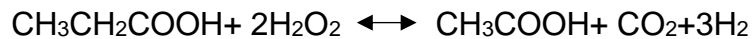
Na segunda fase, as bactérias acidogênicas, também conhecidas como formadoras de ácidos, convertem os produtos gerados na hidrólise em substâncias orgânicas simples como ácidos graxos voláteis (AGV), ácido acético, fórmico, propiônico, butírico e láctico, além do etanol e compostos minerais tais como, CO₂, H₂O, NH₃, H₂S e etc (AMAYA, et al., 2013).

Em geral, a população fermentativa é estritamente anaeróbia e representa cerca de 90% da população bacteriana total dos digestores. Entretanto, algumas espécies são facultativas e podem metabolizar o material orgânico por via oxidativa. Isso adquire suma importância para o referido processo, uma vez que o oxidante presente de forma eventual poderia se tornar uma substância tóxica para as arqueas metanogênicas se não fosse removido pelas acidogênicas facultativas (HAANDEL, LETTINGA, 1994).

Os principais gêneros de bactérias fermentativas acidogênicas são: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Escherichia*, *Desulfobacter* e *Micrococcus* (SILVA, 2014).

3.1.3 Acetogênese

É nesta fase que ocorre a conversão dos produtos gerados na acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção de metano. A função dos micro-organismos nessa fase é degradar os ácidos graxos e álcoois dando origem ao acetato, H₂ e CO₂. A reação de acetogênese é mostrada abaixo (LABIB, et al., 1992):

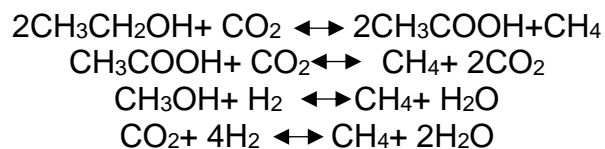


As bactérias acetogênicas responsáveis por essa fase são: *Syntrophobacter wolinii* e *Syntrophomonas wolfei*. Outras bactérias são: *Clostridium* spp., *Peptococcus anerobus*, *Lactobacillus* e *Actinomyces* (MOLINO, et al., 2013).

3.1.4 Metanogênese

Nesta etapa, o acetato, o hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos em gás metano e dióxido de carbono, através da ação de micro-organismos metanogênicos, que também são classificados como arqueas metanogênicas, responsáveis pela fase limitante do processo (MICHAEL, CONSTANTINOS, 2006).

O metano pode ser produzido pelas arqueas acetotróficas a partir da redução do ácido acético (CH₃COOH) ou pelas hidrogenotróficas, que utilizam o dióxido de carbono (CO₂) e o hidrogênio (H₂) para produzir metano. Cerca de 70% do metano produzido é proveniente da redução de acetato, enquanto que aproximadamente 30% provêm da redução de CO₂ com H₂ (YANG, GUO, 1990). As reações metanogênicas podem ser escritas como (MADIGAN, et al., 2009):



As arqueas metanogênicas são anaeróbias estritas que incluem: *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* e *Methanosarcina* (MOLINO, et al.,

2013). Os principais gêneros do grupo das metanogênicas acetoclásticas são: *Methanosarcinas* e as *Methanosaetas*. Os gêneros mais comuns de metanogênicas hidrogenotróficas em reatores anaeróbios são: *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanobrevibacter*, *Methanoculleus* e *Methanocorpusculum* (SILVA, 2014).

3.2 Fatores que interferem na digestão anaeróbica

A formação de metano é influenciada por uma série de parâmetros (Tabela 2). Dessa forma, é importante proporcionar condições ambientais favoráveis para as populações microbianas dentro dos reatores anaeróbios para assegurar que o processo auto-regulador ocorra de maneira estável (MOSEY 1982; RAJESHWARI et al., 2000).

Os fatores ambientais que influenciam a digestão anaeróbia envolvem, principalmente, temperatura, pH, alcalinidade, macronutrientes adequados (N, P, SO_4^{2-}) e micronutrientes (traços de metais), tempo metabólico adequado e uma fonte de carbono (para síntese e energia). A produção máxima ocorre quando estes parâmetros são escolhidos entre a faixa ótima (MORAES et al., 2015).

Tabela 2. Faixa de operação ótima dos principais parâmetros do processo de digestão anaeróbia.

Parâmetros	Faixa geral	Hidrólise e Acidogênese	Metanogênese
pH	6,8 – 7,4	5,2 – 6,3	6,7 – 7,5
Temperatura (°C)	Mesofílica: 35 Termofílica: 55	25 -35	32 - 42 50 – 58
Ácidos graxos voláteis totais (mg/L de ácido acético)	50 - 250	-	-
Ácido acético (mg/L)	<1000	-	-
Ácido propiônico (mg/L)	<250	-	-
Potencial redox (mV)	-200 à -350	+400 à -300	<-250
Alcalinidade (mg/L de $CaCO_3$)	1500-3000	-	-
Relação C/N	-	10 - 45	20 - 30
Relação C: N: P	350:7:1	100:5:1	120:5:1
Hidrogênio (H_2) (mg/L)	<100	-	-

Fonte: KHANAL, 2008; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011.

4 REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE E DE MANTA DE LODO (UASB)

O reator anaeróbio de fluxo ascendente e de manta de lodo ou reator UASB (do inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) foi desenvolvido na década de 1970 por Gatzke Lettinga e colegas de trabalho na Universidade de Agricultura de Wageningen, na Holanda (LETTINGA *et al.*, 1980).

Os reatores UASB tem sido amplamente utilizado para o tratamento de águas residuais industriais e domésticas, sejam de natureza simples ou complexa, de baixa ou de alta concentração, solúveis ou com material particulado. Esses reatores são empregados especialmente nos casos em que tem como objetivo a eliminação ou a conversão da matéria orgânica em metano e a recuperação de água após o tratamento no processo industrial (BERNI *et al.*, 2014).

Os reatores do tipo UASB utilizam um processo de tratamento anaeróbio no qual a matéria orgânica é removida pela ação de micro-organismos, resultando na produção de biogás e na manutenção de um consórcio de micro-organismos (PEREIRA-RAMIREZ *et al.*, 2004; RODRÍGUEZ-GÓMEZ *et al.*, 2014). Uma das principais características deste sistema é a configuração interna que lhe permite o desenvolvimento de uma grande quantidade de biomassa ativa, de flocos ou de grânulos de alta densidade e resistência mecânica, e sua retenção no reator, o que lhe confere um elevado tempo de retenção celular. Com isso, podem-se acomodar altas cargas orgânicas volumétricas, com curto tempo de detenção hidráulica, da ordem de algumas horas, dependendo das condições operacionais e das características dos efluentes a serem tratados.

O desenvolvimento do reator UASB combinou vantagens, as quais possibilitaram a sua utilização para o tratamento de uma grande variedade de águas residuárias. O UASB é capaz de suportar altas taxas de carga orgânica e a grande diferença, quando comparado com outros reatores de mesma geração, é a simplicidade construtiva, o baixo investimento de capital, baixos requisitos de área e de energia, menor geração de lodo, curtos tempos de detenção hidráulica, baixo custo de manutenção e potencial para gerar biogás popularizaram o processo UASB em países tropicais, como o Brasil (CHERNICHARO, 2006; ZHAO *et al.*, 2008; KHAN *et al.*, 2011).

No Brasil, o reator UASB é utilizado desde a década de 80 na Companhia de

Saneamento do Paraná (SANEPAR) e na Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), estações de tratamento de esgoto (ETEs) e, atualmente, é o país que mais faz uso dessa tecnologia devido às suas características técnicas e econômicas (FAEDO, 2010). Segundo Chernicharo (2006) o uso de reatores de manta de lodo no Brasil, para o tratamento de esgoto doméstico tem resultado em experiências bem-sucedidas, com diversos reatores operando em vários estados, demonstrando que o potencial dos mesmos é muito grande.

Relata-se que existem mais de 1.000 reatores UASB instalados em todo o mundo para tratar diferentes tipos de águas residuais industriais (CHONG et al., 2012), tais como soro de queijo (CARRILLO-REYES et al., 2014), sumo de batata (FANG et al., 2011) fibra acrílica, efluente de palma de óleo (AHMAD et al., 2011), etc. A tecnologia dos reatores UASB também são aplicadas para o tratamento de águas residuais domésticas (KHANH et al., 2011).

4.1 Configuração e princípios de operação do reator UASB

Os reatores UASB podem apresentar várias configurações, como tanques cilíndricos, quadrados e retangulares. Em todas configurações, o reator UASB consiste basicamente de três partes fundamentais em sua coluna ascendente: leito de lodo; zona de sedimentação; e separador trifásico. O separador de fases, tem por finalidade dividir a zona de digestão, onde se encontra a manta de lodo responsável pela digestão anaeróbia e a zona de sedimentação (HAMERSKI, 2012).

O afluente a ser tratado é bombeado pelo fundo do reator, uniformemente, e escoar através do lodo biológico ativo (leito de lodo), onde ocorrem as reações necessárias ao seu tratamento. O efluente tratado é coletado na parte superior do reator, em vertedores ou tubulações perfuradas. O gás produzido no compartimento de reação na forma de bolhas é coletado na parte central do separador trifásico no alto do reator (VON SPERLING, 2005). Um diagrama esquemático do reator UASB é ilustrado na Figura 3.

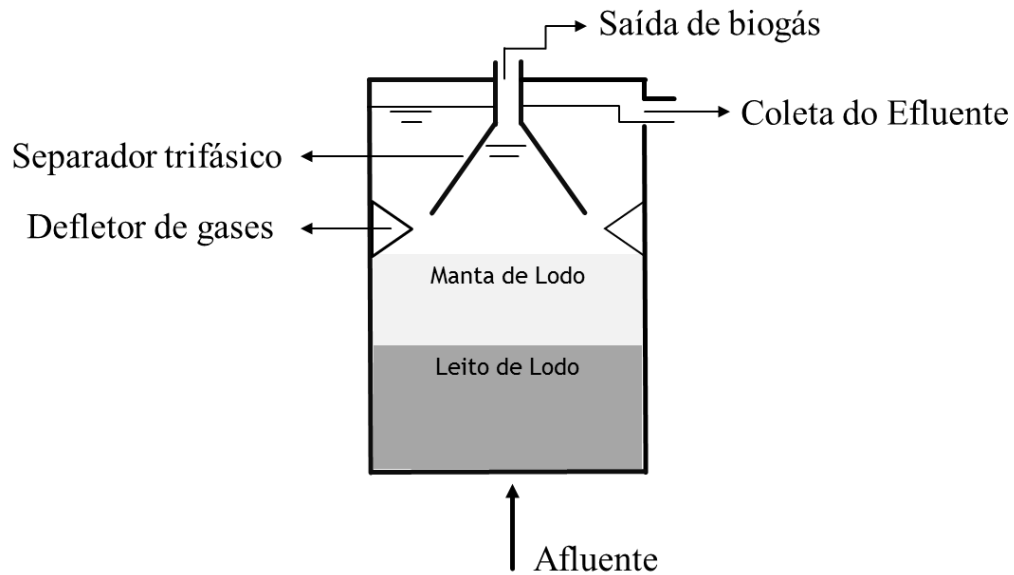


Figura 3. Desenho esquemático de um reator UASB (CHERNICHARO, 1997, adaptado pela autora).

O perfil de sólidos no reator varia de muito denso e com partículas granulares de elevada capacidade de sedimentação, próximas ao fundo (leito de lodo), até um lodo mais disperso e leve, próximo ao topo do reator (manta de lodo) e a estabilização da matéria orgânica ocorre em todas as zonas de reação (leito e manta de lodo), sendo a mistura do sistema promovida pelo fluxo ascensional do esgoto e das bolhas de gás (CHERNICHARO, 2006).

Antes de iniciar a operação de um reator do tipo UASB, deve-se proceder a correta inoculação deste. O reator UASB é inicialmente semeado com inoculo, tal como lodo de esgoto digerido, granular, floculante ou lodos ativados (CHONG et al., 2012). Após inoculado, o substrato a ser tratado é introduzido uniformemente pelo fundo do reator e ao percorrer o leito de lodo ativo, ou seja, a zona de digestão entra em contato com as bactérias anaeróbias presentes, que estabilizam a matéria orgânica disponível e produzem uma mistura gasosa constituída principalmente por metano e dióxido de carbono.

Ao atingir o separador trifásico, este biogás é então encaminhado através das placas defletoras ao sistema de acúmulo e coleta de gases. O líquido oriundo do leito de lodo, contendo partículas em suspensão e algumas vezes lodo disperso, escoam através das aberturas entre as placas defletoras do separador trifásico. Essas placas são

inclinadas de tal maneira que permitam a decantação dos sólidos em suspensão que retornam, assim, ao leito de lodo, contribuindo para o seu enriquecimento e aumentando também o tempo de retenção celular no reator (RIZZO; LEITE, 2004).

4.2 Parâmetros que interferem na digestão anaeróbica em reatores UASB

A tecnologia UASB traz consigo as vantagens fundamentadas na menor produção de lodo e gasto energético. Porém, traz também efeitos bem devastadores caso não sejam devidamente projetados ou operados. Dessa forma, para a obtenção do sucesso no tratamento, algumas condições básicas foram sumarizadas por Lettinga et al. (1980) na qual devem ser empregadas em um reator UASB, para que este apresente alta capacidade de tratamento e elevada eficiência.

- Separação efetiva entre o biogás, o efluente tratado e o lodo;
- O lodo anaeróbio deve apresentar boa decantabilidade e deve-se desenvolver, e se manter, preferencialmente sob a forma granular;
- A alimentação do sistema deve ser feita, sempre que possível, pelo fundo do reator, de forma a proporcionar um melhor contato entre o despejo e o lodo anaeróbio ativo;
- O arraste de partículas de lodo (grânulos) deve ser minimizado criando-se condições nas placas defletoras para que essas partículas floculem, decantem e/ou fiquem retidas em um leito de lodo secundário que se cria na superfície das placas.

Outros fatores, tais como: partida (*start-up*), granulação, pH, temperatura, carga orgânica volumétrica, tempo de detenção hidráulica e velocidade ascensional devem ser extremamente controlados para que o reator UASB apresente alta capacidade de tratamento.

5 BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB

A tecnologia de digestão anaeróbia aplicada a vinhaça foi implementada em algumas destilarias de grande porte, no qual demonstrou uma eficiência de conversão de

mais de 80% em taxas de carregamento orgânico de mais de 20 kg DQO/ m³/ d. Para a quantidade de DQO em vinhaça, cerca de 100 kg de metano é produzido com uma eficiência de remoção de 80% (SOUZA,1992; VAN HAANDEL 2005).

A digestão da vinhaça tem recebido maior atenção somente após o desenvolvimento dos reatores UASB, que é o mais adaptado a vinhaça. Os reatores UASB possibilitam a circulação da vinhaça através de uma região que apresenta elevada concentração de micro-organismos.

Os reatores UASB podem tratar efluentes com altas cargas orgânicas, por exemplo, 30 kg DQO/m³ reator. dia. e com curtos tempos de detenção hidráulica. Se a biodigestão for conduzida em reatores anaeróbios convencionais, o processo é lento e com tempos de detenção hidráulica longos para se completar o processo (VON SPERLING, 2005). Sendo este, sem dúvida, o principal obstáculo técnico para uma eventual aplicação do processo de digestão anaeróbia para a vinhaça, que pode ser superado na utilização dos reatores do tipo UASB (SOUZA,1992). As características físico-químicas da vinhaça antes e após o tratamento anaeróbio em reator do tipo UASB são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Características físico-químicas da vinhaça - Usina São Martinho.

Parâmetro	Vinhaça (antes da biodigestão)	Vinhaça (depois da biodigestão)
pH	4,0	6,9
DBO (mg/l)	29.000	9.000
Nitrogênio total (mg/l)	550	600
Nitrogênio Amoniacal (mg/l)	40	220
Fósforo P ₂ O ₅ (mg/l)	17	32
Sulfato (mg/l)	450	32
Potássio K ₂ O (mg/l)	1.400	1.400

Fonte: CORTEZ, 1996.

Uma das vantagens da biodigestão da vinhaça, além da possibilidade do aproveitamento do biogás gerado, é que seu potencial de fertilização continua o mesmo após o processo. Deve-se ressaltar que a concentração de potássio contida na vinhaça não se altera depois do processo de biodigestão conforme apresenta a Tabela 4, fazendo

com que a vinhaça biodigerida possa ser levada ao campo para a fertirrigação. De um modo geral, a biodigestão anaeróbia da vinhaça em reatores UASB apresenta como benefícios, a conservação dos nutrientes, aumento do pH, um menor consumo de energia (comparativamente a outros sistemas aeróbios), menor produção de lodo em virtude da menor produção de biomassa e redução da carga orgânica da vinhaça para sua aplicação no solo, etc. (CORTEZ et al., 2007; SALOMON et al., 2007).

O biogás, por sua vez, dependendo da concentração de matéria orgânica no substrato (17-50 g L⁻¹ de DBO), seria possível produzir de 5,1 até 15,03 m³ por m³ de CH₄ a partir da vinhaça (BAEZ-SMITH, 2006). No entanto, de acordo com avaliações de energia realizados, mostraram que a biodigestão anaeróbia da vinhaça poderia realizar ainda uma maior produção de metano, alcançando valores de 6,97-14,23 m³ de CH₄ por m³ de vinhaça (SALOMON; LORA, 2009; SOUZA et al., 2012).

De acordo com Granato et al. (2002) o biogás proveniente da biodigestão anaeróbia da vinhaça podem ser exploradas das seguintes maneiras: (i) queimá-lo completamente na caldeira, gerando vapor para operar todo o mecanismo para esmagar a cana-de-açúcar. Neste caso, os estudos mostram que existe um excedente de 25-28% de todo o bagaço que é geralmente queimado em caldeiras e poderia ser utilizado para outros fins; (ii) um terço do biogás poderia ser purificado, produzindo metano para substituir todos os combustíveis utilizados na indústria agrícola durante a colheita, e os restantes dois terços seriam queimados em caldeiras que fornecem um excedente de 18% do bagaço; (iii) utilizar a totalidade do biogás para acionar uma turbina a gás, conjugada a um gerador elétrico.

5.1 Produção de biogás no Brasil a partir do uso da vinhaça

O interesse crescente na produção de biogás a partir da vinhaça e de outros resíduos, bem como a questão da melhoria na gestão desses resíduos, vem intensificando-se no Brasil. Embora o uso de biogás no Brasil hoje está limitado a algumas plantas de digestão, a avaliação do potencial de produção de biogás e geração de energia a partir de fontes importantes de resíduos orgânicos é importante subsídio para novas discussões e políticas públicas. Outros países como a China, Índia, Nepal,

Tailândia, Alemanha, Estados Unidos e a Dinamarca têm uma longa experiência no desenvolvimento de programas e projetos de biogás (SALOMON; LORA, 2009).

No Brasil, é conhecido a produção de biogás a partir de alguns projetos urbanos, como por exemplo, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) que gera energia através do uso de biogás produzido na estação de tratamento de esgoto de Barueri (GOLDEMBERG, 2006). No interior do Brasil, o uso de agroenergia a partir do biogás é uma realidade crescente. Os principais projetos estão localizados no sul do Brasil (COIMBRA-ARAÚJO et al., 2014).

A única estação de tratamento de vinhaça mencionado na literatura que produz biogás no Brasil, está localizada no estado de São Paulo na Usina São Martinho, maior usina de processamento de cana-de-açúcar no Brasil. O reator utilizado consiste em um UASB, construído na década de 1990, com vazão de 5000 m³ e operado sob condições termofílicas (SOUZA et al., 1992). O biogás produzido é aplicado para secar a levedura utilizada na fase de fermentação. No entanto, a eficiência do tratamento é normalmente modesta porque a principal preocupação neste caso é apenas a produção adequada de biogás para secagem da levedura (MORAES et al., 2015).

A necessidade de ampliar a sustentabilidade do setor de bioetanol da cana-de-açúcar, fez com que outras usinas sucroalcooleiras buscassem também a otimização energética do processo com a biodigestão anaeróbica da vinhaça.

A Usina sucroalcooleira Jalles Machado, juntamente com o Governo de Goiás, o Sindicato da Indústria de Fabricação de Etanol do Estado de Goiás (SIFAEG) e outros órgãos de pesquisa assinaram no ano de 2014, um protocolo de intenções para produção de biogás a partir da vinhaça. A princípio, a ideia é formar um grupo de profissionais para elaboração de estudos de viabilidade técnica, econômica e financeira, assim como identificar e propor os incentivos necessários ao desenvolvimento de projetos, produção e utilização de biogás, a partir da vinhaça de cana-de-açúcar (MORENO, 2014). Com a produção de energia através do biogás, as usinas podem suprir suas próprias demandas de energia elétrica e vender o excedente para concessionárias de energia.

De acordo com Moraes et al. (2014) para uma fábrica simples de processamento de etanol que processa 2,0 milhões de toneladas de cana por temporada, o potencial poder de produção de biogás gerado seria de aproximadamente 18 MW por temporada,

considerando um teor de CH₄ de 60% (v/v) no biogás. Em termos nacionais, este potencial alcançaria aproximadamente 3500 MW por safra se toda a vinhaça gerada no Brasil fosse biodigerida.

O Estado de São Paulo, um dos grandes produtores de cana-de-açúcar no Brasil, é responsável por mais de 56% da cana processada na temporada 2013-2014. O estado está comprometido em um ambicioso plano para aumentar ainda mais a sua quota de energia renovável de 55% para 69% até 2020, bem como para reduzir as emissões de CO₂ em 20% em comparação com os níveis de 2005. Para alcançar essas metas, entre outras medidas, um programa de biogás foi lançado em 2012 para estimular e aumentar a utilização sustentável da biomassa para a produção de biogás, incluindo uma futura participação obrigatória de biometano na rede de gás natural (JANKE et al., 2015).

Apesar da viabilidade econômica e dos benefícios ambientais da digestão anaeróbica da vinhaça, existem vários obstáculos que impedem a sua aplicação em escala industrial completa. Na literatura autores destacam os principais obstáculos para a produção no Brasil (SALOMON; LORA 2009; MORAES et al., 2015):

- Atual viabilidade de disposição da vinhaça *in natura* no cultivo de cana (fertirrigação);
- Predominância de abordagens empíricas nos estudos fundamentais de digestão anaeróbia da vinhaça;
- Resultados insatisfatórios obtidos das poucas plantas em grande escala;
- O estágio atual da pesquisa sobre digestão anaeróbia da vinhaça da cana é insatisfatório. Os poucos estudos científicos são muitas vezes inconclusivos, até mesmo conflitantes.
- Falta de valorização do biogás como fonte de energia alternativa.
- Falta de um programa nacional de biogás;
- Financiamento específico e incentivos do governo;
- Dificuldades enfrentadas pelas pequenas unidades de biogás em comercializar seus créditos de carbono e os elevados custos de investimento.

6 CONCLUSÃO

A tecnologia de digestão anaeróbia poderá ser uma alternativa viável para o aproveitamento e tratamento da vinhaça. A biodigestão anaeróbia tem como objetivo reduzir o potencial poluidor da vinhaça e ao mesmo tempo produzir energia através do biogás e um biofertilizante como resíduo. Apesar de apresentar barreiras tecnológicas, econômicas e políticas, o uso do biogás a partir da da vinhaça pode tornar-se uma opção mais interessante para o Brasil nos próximos anos, pois representa uma promissora ferramenta para minimizar impactos ambientais e ao mesmo tempo, se estabelecer como importante fonte de energia renovável. O reator UASB tem se mostrado o mais adequado para a vinhaça, pois está associado a inúmeras vantagens que o sobressai em relação aos reatores anaeróbios convencionais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, A.; GHUFRAN, R.; WAHID, Z. A. Role of calcium oxide in sludge granulation and methanogenesis for the treatment of palm oil mill effluent using UASB reactor. **Journal of Hazardous Materials**, v. 198, p. 40–48, 2011.
- AMAYA, O. M.; BARRAGÁN, M. T. C.; TAPIA, F. J. A. Chapter 18-Microbial Biomass in Batch and Continuous System. **Biomass Now – Sustainable Growth and Use**, 2013.
- BAEZ-SMITH, C. Anaerobic Digestion of Vinasse for the Production Of Methane in the Sugar Cane Distillery. **SPRI Conference on Sugar Processing**, p. 268–287, 2006.
- BARROS, R. P.; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L. SOUZA, R. M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R. A.; BARRETTO, M. C. V.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, p. 341-346, 2010.
- BATSTONE, D. J.; JENSEN, P. D. Treatise on Water Science. Oxford: Elsevier, p. 615-639, 2011.
- BERNI, M.; DORILEO, I.; NATHIA, G.; FORSTER-CARNEIRO, T.; LACHOS, D.; SANTOS, B. G. M. Anaerobic Digestion and Biogas Production : Combine Effluent Treatment with Energy Generation in UASB Reactor as Biorefinery Annex. **International Journal of Chemical Engineering**, v. 2014, p. 8, 2014.
- CARRILLO-REYES, J.; CELIS, L. B.; ALATRISTE-MONDRAGO, F.; RAZO-FLORES, E. Decreasing methane production in hydrogenogenic UASB reactors fed with cheese whey. **Biomass and Bioenergy**, v. 63, p. 101–108, 2014.
- COIMBRA-ARAÚJO, C. H.; MARIANE, L. J.; JÚNIOR, C. B.; FRIGO, E. P.; FRIGO, M. S.; ARAÚJO, I. R. C.; ALVES, H. J. Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 826–839, 2014.
- CORTEZ, L.A.B., SILVA, A., DE LUCAS JUNIOR, J., JORDAN, R.A., DE CASTRO, L.R. Biodigestão de Efluentes. In: Cortez, L.A.B., Lora, E.S. (Eds.), **Biomassa para Energia**, Editora da UNICAMP, Campinas, p. 493–529, 2007.
- CORTEZ, L. A. B.; FREIRE, W. J.; ROSILLO-CALLE, F. Biodigestion of vinasse in Brazil. **Internacional Sugar Journal**, v. 100, n. 1196, p. 403-413, 1996.
- COLIN, V. L.; CORTEZ, A. A. J.; APARICIO, J. D.; AMOROSO, M. J. Chemosphere Potential application of a bioemulsifier-producing actinobacterium for treatment of vinasse. **Chemosphere**, v. 144, p. 842–847, 2016.

CHONG, S.; SEN, T. K.; KAYAALP, A.; ANG, H. M. The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment - A State-of-the-art review. **Water Research**, v. 46, n. 11, p. 3434–3470, 2012.

CHERNICHARO, C. A. de L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios 2ª ed. Belo Horizonte: **DESA/UFMG**, v. 5, p. 245, 1997.

CHERNICHARO, C. Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 5, p. 73–92, 2006.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. E.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S.L. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752–2761, 2013.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. **John Wiley & Sons**, Weinheim, 2011.

DOWD, M. K., JOHANSEN, S. L., CANTARELLA, L., & REILLY, P. J. Low molecular weight organic composition of ethanol stillage from sugarcane molasses, citrus waste, and sweet whey. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 42, p. 283–288, 1994.

DOELSH, E., MASON, A., CAZEVIEILLE, P., & CONDOM, N. Spectroscopic characterization of organic matter of a soil and vinasse mixture during aerobic or anaerobic incubation. **Waste Management**, v. 29, p. 1929–1935, 2009.

ESPAÑA-GAMBOA, E.; MIJANGOS-CORTES, J.; BARAHONA-PEREZ, L.; DOMINGUEZ-MALDONADO, J.; HERNÁNDEZ-ZÁRATE, G.; ALZATE-GAVIRIA, L. Vinasses: characterization and treatments. **Waste Management & Research**, v. 29, p. 1235–1250, 2011.

FAEDO, A. M. **Tecnologias convencionais e novas alternativas para o tratamento de efluentes domésticos**. Florianópolis, 2010, 39 p. Dissertação (Especialista em Eng. Do Controle da Poluição Ambiental), Universidade do Sul de Santa Catarina.

FANG, C.; BOE, K.; ANGELIDAKI, I. Biogas production from potato-juice, a by-product from potato-starch processing, in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) and expanded granular sludge bed (EGSB) reactors. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 5734–5741, 2011.

FERREIRA, L.F. R.; AGUIAR, M. M.; MESSIAS, T. G.; POMPEU G. B.; LOPEZ, A. M. Q.; SILVA D. P.; MONTEIRO, R. T. Evaluation of sugarcane vinasse treated with *Pleurotus sajor-caju* utilizing aquatic organisms as toxicological indicators. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 74, p. 132–137, 2011.

GIANCHINI, C. F.; FERRAZ, M. V. Benefícios da utilização de vinhaça em terras de plantio de cana-de-açúcar-Revisão de Literatura. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 15, 2009.

GOLDEMBERG, J. **Biogás: Pesquisas e Projetos no Brasil**. São Paulo: CETESB, 2006.

GRANATO, E. F.; SILVA, C. L. Geração de energia elétrica a partir do resíduo vinhaça. **Encontro de Energia no Meio Rural**, 2002.

HAANDEL, A. C. V.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbico de esgotos: um manual para regiões de clima quente. Campina Grande: **Epigraf**, p. 208, 1994.

HAMERSKI, F. **Fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) no tratamento de efluentes**. Santa Maria, 2012, 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processo), Universidade de Santa Maria.

JANKE, L.; ATHAYDES, L.; NIKOLAUSZ, M.; SCHMIDT, T.; LIEBETRAU, J.; NELLES, M.; STINNER, W. Biogas Production from Sugarcane Waste : Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing. **International Journal of Molecular Science**, v. 16, p. 20685–20703, 2015.

JUNIOR, A. D. N. F.; WENZEL, J.; ETCHEBEHERE, C.; ZAIAT, M. Effect of organic loading rate on hydrogen production from sugarcane vinasse in thermophilic acidogenic packed bed reactors. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 30, p. 16852–16862, 2014.

KHAN, A. A.; GAUR, R. Z.; TYAGI, V. K.; KHURSHEED, A.; LEW, B.; MEHROTRA, I.; KAZMI, A. A. Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, p. 1232-1251, 2011.

KHANH, D.; QUAN, L.; ZHANG, W.; HIRA, D.; FURUKAWA, K. Effect of temperature on low-strength wastewater treatment by UASB reactor using poly(vinyl alcohol)-gel carrier. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 24, p. 11147–11154, 2011.

KHANAL, S. K. Anaerobic biotechnology for bioenergy production. **Principles and Application Willey and Blackwell**, p. 161-86, 2008.

KOTHARI, R.; PANDEY, A. K.; KUMARB, S.; TYAGI, V.V.; TYAGI, S. K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 174–195, 2014.

LABIB, F.; FERGUSON, J. F.; BENJAMIN, M. M.; MERIGH, M.; RICKER, N. L. Anaerobic butyrate degradation fluidized-bed reactor. Effects of increased concentration of H₂ and acetate. **Environmental Science Technology**, v. 26, n. 2, 369- 376, 1992.

- LAIME, E. M. O.; FERNANDES, P. D.; OLIVEIRA, D. C. D.; FREIRE, E. A. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça : uma revisão Technological possibilities for the disposal of vinasse : a review. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 3, p. 16–29, 2011.
- LAMONICA, H. M. **Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça**. Campinas: Editora Unicamp, 2006.
- LETTINGA, G.; van Velsen, A. F. M.; Hobma, S. W.; Zeeuw, W. D.; Klapwijk, A. Use of the upflow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 22, p. 699–734, 1980.
- MACEDO, I. D.C. Sugar Cane's Energy—**Twelve Studies on Brazilian Sugar Cane agribusiness and its sustainability**, 2nd ed. UNICA: São Paulo, Brazil, p. 119–137, 2007.
- MADIGAN M. T.; MARTINKO J. M.; DUNLAP, P.V.; CLARK, D.P. **Brock biology of micro-organisms**. 12^a ed. Benjamin Cummings, 2009.
- MADSEN, M.; HOLM-NIELSEN, J. B.; ESBENSEN, K. H. Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3141–3155, 2011.
- MALAJOVICH M. A. Biotecnologia 2011. **Edições da Biblioteca Max Feffer do Instituto de Tecnologia ORT**. Rio de Janeiro, 2012.
- MICHAEL, N.; CONSTANTINOS, P.H. Chapter 8- Biological processes. **Waste management series**. Elsevier, p. 171–218, 2006.
- MOLINO, A.; NANNA, F.; DING, Y.; BIKSON, B.;BRACCIO, G. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. **Fuel**, v. 103, p. 1003–1009, 2013.
- MONLAU, F.; SAMBUSITI, C.; ANTONIOU, N.; BARAKAT, A.; ZABANIOTOU, A. A new concept for enhancing energy recovery from agricultural residues by coupling anaerobic digestion and pyrolysis process. **Applied Energy**, v. 148, p. 32–38, 2015.
- MORAES, B. S.; JUNQUEIRA, T. L.; PAVANELLO, L. G.; CAVALETT, O.; MANTELATTO, P. E.; BONOMI, A.; ZAIAT, M. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, v. 113, p. 825–835, 2014.
- MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil_ Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, 2015.

- MORENO, A. **Usina firma parceria para produção de biogás de vinhaça para substituir diesel**. Disponível em <<http://www.jornalcana.com.br/usina-firma-parceria-para-producao-de-biogas-de-vinhaca-para-substituir-diesel/>>. Acesso em: 13 jul. 2015.
- MOSEY, F. E. New developments in the anaerobic treatment of industrial wastes. **Water Pollution Control**, v. 81, ed. 4, p. 540-552, 1982.
- PEREIRA, S.Y. Environmental aspects in ethanol production related to vinasse disposal and groundwater. In: 33rd **International geological congress**, p. 6–14, 2008.
- PEREIRA-RAMIREZ, O.; QUADRO, M. S.; ANTUNES, R. M.; KOETZ, P. R. Influência da recirculação e da alcalinidade no desempenho de um reator uasb no tratamento de efluente de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v. 10, n. 1, p. 103–110, 2004.
- PRADO, R. D. M.; Caione, G.; Campos, C. N. S. Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2013, p. 8, 2013.
- PRASAD, R. K.; KUMAR, R. R.; SRIVASTAVA, S. N. Design of Optimum Response Surface Experiments for Electro-Coagulation of Distillery Spent Wash. **Water Air Soil Pollut**, v.191, p. 5–13 , 2008.
- RAJESHWARI K. V.; BALAKRISHNAN M.; KANSAL A.; LATA K.; KISHORE V.V.N. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 4, p.135–56, 2000.
- RIZZO, A. D. L.; LEITE, S. Produção de sulfeto em reator do tipo UASB e sua potencial aplicação na remoção de metais pesados. **Série Tecnologia Ambiental**, v. 32, p. 102, 2004.
- ROLIM, M. M.; LYRA, M. R. C. C.; DUARTE, A. S.; MEDEIROS, P. R. F.; SILVA, E. F. F.; PEDROSA, E. M. R. Influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade da água freática. **Revista Ambiente & Agua- An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 8, n. 1, p. 155-171, 2013.
- RODRÍGUEZ-GÓMEZ, R.; RENMAN, G.; MORENO, L.; LIU, L. A model to describe the performance of the UASB reactor. **Biodegradation**, v. 25, p. 239–251, 2014.
- SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S.; MONROY, E. F. C. Custo Do Biogás Proveniente Da Biodigestão Da Vinhaça e Sua Utilização. **8º Congresso Iberoamericano De Engenharia Mecânica**, p. 1–8, 2007.
- SALOMON, K. R.; SILVA LORA, E. E. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009.

SILVA, P. D. E. C. E. **Desempenho de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente como unidade**. 2014. Lavras, 2014, 102 p. Dissertação (Mestre em Tecnologias e Inovações Ambientais), Universidade Federal de Lavras.

SOUZA, M. E.; FUZARO, G.; POLEGATO, A. R. Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant UASB reactor. **Water Science and Technology**, v. 25, n. 7, p. 213–222, 1992.

SOUZA, N.S. M.; BORSOI, A.; SANTOS, R. F.; SECCO, D. Production potential of biogas in sugar and ethanol plants for use in urban buses in Brazil. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 10, p. 20–22, 2012.

SYDNEY, E. B. LARROCHE, C.; NOVAKA, A. C.; NOUAILLE, R.; SARMA, S. J.; BRAR, S. K.; LETTI, L. A. J.; SOCCOL, V. T.; SOCCOL, C. R. Economic process to produce biohydrogen and volatile fatty acids by a mixed culture using vinasse from sugarcane ethanol industry as nutrient source. **Bioresource Technology**, v. 159, p. 380–386, 2014.

TRIOLO, J.M., PEDERSEN, L., QU, H., SOMMER, S.G. Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. **Bioresource Technology**, v.125, p. 226–232, 2012.

UNICA (União da Indústria da Cana-de-açúcar) UnicaData: **Brazilian sugarcane crushing during 2013/2014 season**. Disponível em < <http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 11 Ago. 2015.

VAN HAANDEL, A. C. Integrated energy production and reduction of the environmental impact at alcohol distillery plants. **Water Science and Technology**, v. 52, p. 49–57, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, 3ª. edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2005.

WILKIE, A. C., RIEDESEL, K. J., & OWENS, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v.19, p. 63–102, 2000.

YANG, S. T.; GUO, M. Kinetics of methanogenesis from whey permeate in packed bed immobilized cells bioreactor. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 36, n. 4, p. 427–436, 1990.

ZHAO, B.; YUE, Z.; ZHAO, Q.; MU, Y.; YU, H.; HARADA, H.; LI, Y. Optimization of hydrogen production in a granule-based UASB reactor. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 10, p. 2454–2461, 2008.

ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V.
Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo: I. Características do solo.
Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, n. 1, p. 22–28, 2011.

CAPÍTULO 2

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB

TUNES, C. R.; DE MORAIS, P. P.; PORTELLA, A. C. F.; AGUIAR, R. W. S.; SILVA, A. R.; BIS, D. P.; SCHEIDT, G. N. Produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbica de vinhaça em reator UASB. **International Journal of Current Research**, v. 8, n. 09, p. 38699-38703, 2016.

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE VINHAÇA EM REATOR UASB

RESUMO

A expansão na produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil acarretou em uma maior produção de vinhaça, a qual representa o principal subproduto da indústria sucroalcooleira. A vinhaça é um efluente altamente poluidor e gerado em grandes volumes, o que agrava o problema de sua destinação final. Uma alternativa de tratamento da vinhaça é o seu aproveitamento para geração de biogás em reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) que pode ser utilizado como uma fonte de energia alternativa e sustentável. Neste estudo, a eficiência do reator UASB para a produção de biogás a partir da digestão anaeróbica da vinhaça de cana-de-açúcar foi avaliada. O experimento foi realizado em escala laboratorial usando o reator UASB em temperatura mesofílica e com capacidade de 87 L, e utilizando como matéria-prima a vinhaça do processo da produção de etanol. O reator UASB operou durante 15 dias, com COV de 2 Kg DQO m⁻³ d⁻³ e TDH de 11,5 dias. Os resultados obtidos neste estudo mostraram um bom funcionamento do reator UASB aplicado a vinhaça. Este estudo obteve-se uma eficiência de remoção de DQO de 71% e volume de biogás acumulado de 1160 litros com concentração de metano em torno de 48 a 57 %.

Palavras-Chave: vinhaça; digestor anaeróbico; energia sustentável; biogás.

BIOGAS PRODUCTION FROM ANAEROBIC DIGESTION OF VINASSE IN UASB REACTOR

ABSTRACT

The expansion in the production of ethanol from sugarcane in Brazil resulted in increased production of vinasse, which is the main by-product of the sugar industry. The vinasse is a highly polluting effluent is generated in large volumes, which aggravates the problem of its final disposal. An treatment alternative of vinasse is its use for the generation of biogas in UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) that can be used as an alternative source of sustainable energy. In this study, the UASB efficiency for the production of biogas from the anaerobic digestion of vinasse from sugarcane was evaluated. The experiment was conducted in laboratory scale using the UASB in mesophilic temperature and 87 L capacity, and using as raw material the vinasse from the process of the production of ethanol. The UASB reactor has operated for 15 days with VOC 2 kg DQO m⁻³ d⁻³ and TDH of 11.5 days. The results obtained in this study shows a good functioning of the UASB applied vinasse. This study obtained an COD removal efficiency of 71% and the volume of accumulated biogas 1160 liter and methane concentration around 48-57%.

Keywords: vinasse; anaerobic digester; sustainable energy; biogas.

1 INTRODUÇÃO

A oferta mundial de energia é baseada em combustíveis fósseis (75%); a escala em que os combustíveis fósseis são usados levaram rapidamente à depleção desses recursos. Além disso, o uso de combustíveis fósseis é responsável por inúmeros problemas ambientais e a maioria das emissões de gases de efeito estufa. O uso de energia deve crescer como resultado de avanços em muitas das regiões em desenvolvimento do mundo. O desafio atual é buscar fontes de energia renováveis e aumentar a eficiência na geração de energia e usar em uma escala sem precedentes (UNICA, 2007).

Neste cenário, a produção de biogás a partir da tecnologia de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos surge como uma alternativa interessante e sustentável, pois a sua combustão não contribui para o efeito estufa por causa de suas fontes renováveis. A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos tem duas vantagens, ou seja, o tratamento de resíduos e geração de biogás que pode ser usado como fonte de energia alternativa (BUDIYONO; SUMARDIONO, 2013).

Essa tecnologia já foi empregada com sucesso para remediar uma variedade de resíduos com potencial para gerar biogás, tais como águas residuais industriais e domésticas, resíduos sólidos urbanos e agrícolas, lodo de esgoto, resíduos de animais e etc (NGUYEN et al., 2015). Além disso, os resíduos líquidos, como a vinhaça foi tratada de forma mais eficaz através da utilização de tratamento anaeróbio (ESPINOZA-ESCALANTE et al., 2009; SILES et al., 2011).

Empurrada pela demanda por energia renovável, a indústria do etanol no Brasil está em expansão. No entanto, o setor sucroalcooleiro brasileiro é conhecido por gerar grandes quantidades de resíduos de processamento de cana, devido ao seu tamanho. A produção de 1 L de etanol gera cerca de 13 L de resíduos líquidos (vinhaça), assim esta expansão resulta numa necessidade crescente para um destino mais adequado desses resíduos (BONCZ et al., 2012).

A vinhaça é composta predominantemente de água e de sólidos, respectivamente 93% e 7% (CARRILHO et al., 2016). Em geral, a vinhaça tem um elevado teor de matéria orgânica e de potássio, e relativamente pobres conteúdos de nitrogênio, cálcio, fósforo e

magnésio (UNICA, 2007). Devido suas características, a vinhaça é comumente dispersada sobre os campos de cana de açúcar na prática de fertirrigação, porém, a digestão anaeróbia deste resíduo pode ser uma solução melhor, oferecendo adicionalmente uma fonte alternativa de energia. A vinhaça contém matéria orgânica de fácil digestão e é um substrato potencial para produzir biogás (MORAES et al., 2015).

A digestão anaeróbia utilizando a vinhaça como substrato para a produção de biogás deve concentrar-se nesses tipos de reatores, tais como reatores de leito fixo, reatores de leito fluidizado ou sistemas de lodos granulares, especialmente o reator de fluxo ascendente anaeróbio de manta de lodo (UASB, do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). O reator UASB pode tratar efluentes com mais de 30 kg COD/m³ reator/dia, sendo por este motivo uma boa opção tecnológica para o Brasil (CORTEZ et al., 1996). Este reator já é utilizado com sucesso no Brasil para o tratamento de diferentes tipos de águas residuais (JANKE et al., 2015). De acordo com Von Sperling (2005), os reatores UASB são os mais adaptados a vinhaça.

Em face ao exposto objetivou-se com este trabalho de pesquisa, avaliar a eficiência do reator UASB para a produção de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Características gerais

A pesquisa foi conduzida no Departamento de gestão de resíduos e fluxo de materiais do Instituto de Engenharia Ambiental da Universidade de Rostock, Alemanha. O reator UASB foi operado durante 15 dias, correspondendo o período entre 05 de maio de 2015 até 19 de maio de 2015.

2.2 Caracterização da vinhaça

A vinhaça utilizada neste estudo foi obtida a partir de uma indústria de etanol e açúcar durante a estação de colheita de 2013/2014. A indústria de etanol está localizada no Estado de São Paulo, onde o etanol é produzido a partir do melaço de cana. Amostras de vinhaça foram enviados para Alemanha em recipientes térmicos e mantido sob baixa temperatura (4 °C) até seu uso.

As amostras de vinhaça foram submetidas as análises de: sólidos totais (ST) (EN 12 879, 2001) e sólidos voláteis (SV) (EN 12 880, 2001); pH (APHA et al.,1995); demanda química de oxigênio (DQO) (DIN 38 409- H41-1, 1980). As características da vinhaça utilizada neste estudo são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades da vinhaça utilizada neste estudo.

Parâmetros	Valores
DQO (mg/ L O ₂)	23000
MS (% total)	8,10
SV (% total)	7,30
SV (% total de MS)	90,1
pH	4,11

Observações: DQO, demanda química de oxigênio; MS, matéria seca; SV, sólidos voláteis; pH, potencial hidrogeniônico.

2.3 Inóculo

Este estudo utilizou como inóculo, o lodo digerido proveniente da biodigestão anaeróbica de resíduos de batata, obtida de um biodigestor industrial, localizado em uma fazenda cultivadora de batatas, no estado de Mecklenburg-Vorpommern, Alemanha. A biomassa utilizada como inóculo contém bactérias e arqueas metanogênicas capazes de degradar o efluente. Em um processo de partida, preencher o reator com lodos provenientes de reatores já estabilizados contendo micro-organismos anaeróbios, principalmente arqueas metanogênicas, aceleram o início da digestão anaeróbica.

2.4 Reator UASB

Este estudo utilizou como digestor anaeróbio o reator UASB (Figura 1), que possibilita a circulação da vinhaça através por uma região que apresenta elevada concentração de micro-organismos. O reator UASB utilizado para essa pesquisa era de vidro com um diâmetro de 0,3 m, área de seção transversal de 0, 0707 m² e um volume útil de aproximadamente 85 litros, com dois pontos de coleta de amostra ao longo do seu corpo.



Figura 1. Reator UASB utilizado no experimento (O autor, 2015).

2.5 Procedimento experimental

O reator UASB foi inicialmente inoculado com lodo proveniente de um reator anaeróbio industrial, usado para tratar resíduos de batata. A alimentação do reator com vinhaça foi feita através de uma bomba peristáltica e operou em condição intermitentemente: a cada duas horas o reator era alimentado durante 1 minuto como uma vazão de 617,95 ml/min, dessa forma, o sistema de alimentação operou 12 d⁻¹. O sistema de alimentação consistia em um recipiente de plástico de 10 L, que era abastecido diariamente com o efluente mantido em geladeira a 4°C. Tal recipiente de alimentação era mantido à temperatura ambiente sobre um agitador magnético para evitar eventual sedimentação de sólidos.

O reator foi mantido na faixa de temperatura mesofílica de 30 a 35 °C, através de água aquecida, ao redor do reator e espuma isolante. O reator operou com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 11,5 d e carga orgânica volumétrica (COV) de 2 Kg DQO m⁻³ d⁻³, no qual era requerida a entrada diária 7,39 L d⁻¹ de vinhaça. A velocidade ascensional foi calculada em 0,583 m hr⁻¹. Tal valor está na faixa recomendada (0,5 a 0,7 m/hora) por Chernicharo (2007).

Ao atingir o separador trifásico, o biogás formado era encaminhado através das placas defletoras ao sistema de acúmulo e coleta de gases. A produção de gás foi medida através de um medidor de vazão de biogás da marca Ritter instalado junto ao reator para medir a produção de biogás diário. O volume de biogás era quantificado a cada 30 minutos por dia. Para o armazenamento do biogás produzido, foram confeccionadas sacolas de material metalizado (Figura 2). A leitura da composição do biogás foi feita diariamente através do Software (método) Visit 3.



Figura 2. Sacolas usadas para armazenamento de biogás em escala laboratorial (O autor, 2015).

2.6 Métodos analíticos

Foram realizadas as seguintes análises durante o experimento: pH (pHmetro); DQO (DIN 38 409-H41-1, 1980); relação de alcalinidade (do alemão: FOS/TAQ- ácidos graxos voláteis/carbono inorgânico total) baseado no método de Nordmann (1977); nas amostras compostas do efluente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estabilidade do digestor

A formação de metano é influenciada por uma série de parâmetros. Dessa forma, é necessário garantir que o processo de digestão anaeróbia seja realizada em condições estáveis, a fim de obter um maior rendimento de biogás.

O pH e a temperatura são um dos importantes indicadores utilizados para controlar a estabilidade do processo no digestor. A taxa de crescimento de micro-organismos é significativamente afetada pela mudança de pH. O valor de pH verificado durante o experimento permaneceu na faixa de 7,3-7,6. A faixa de pH ideal para a digestão anaeróbica tem sido relatada como sendo entre 6,8-7,4 (MAO et al., 2015). A temperatura dentro do reator manteve-se na faixa mesofílica, oscilando entre 32 e 35 °C. A faixa de temperatura em que atuam bactérias mesofílicas é entre 25°C e 40°C, porém o processo de geração de biogás tem maior rendimento acima de 32°C, pois a temperatura ideal para a formação de metano é entre 35°C e 37°C (KARLSSON et al., 2014).

Segundo Wilkie, Riedesel e Owens (2000), com a digestão mesofílica é possível obter uma eficiência de remoção de DQO superior a 70%, bem como um rendimento médio de metano superior a 0,25 m³ /kg DQO. A influência da temperatura sobre o desempenho de um reator UASB é muito importante uma vez que afeta de forma significativa o processo de hidrólise, a taxa de utilização do substrato, sedimentação dos sólidos e as taxas de transferência de gás (LETTINGA, et al., 1993; LETTINGA, et al., 2001). Por essa razão é necessário que a temperatura de fermentação seja mantida estável e não apresente grandes variações durante o processo.

Outro parâmetro indicador de estabilidade do processo de digestão é a relação de alcalinidade (FOS/TAQ). O valor TAC é uma estimativa da capacidade tampão da amostra no digestor e o valor de FOS corresponde ao teor de ácidos graxos voláteis e é um indicador importante de problemas no processo. Segundo Drosig (2013), a capacidade tampão devido ao bicarbonato é importante no processo de biogás de modo que uma moderada acumulação de ácidos graxos voláteis não causa uma diminuição do pH que acabaria por levar ao fim a produção de biogás.

O valor de FOS/TAQ obtido nesse estudo foi 0,157- 0,195. O sistema de biogás é estável entre FOS/TAC 0,3-0,4 valores baseados na prática (MÉZES; TAMAS; BORBELY, 2011). O estado de processo de degradação anaeróbica está correto também de acordo com os resultados de Voß E. et al. (2009), que determinou outro intervalo ideal entre 0,15 e 0,45. O valor de FOS/TAQ obtido nesse estudo está na faixa ideal de acordo com outros estudos, o que mostra a estabilidade do digestor UASB operando com vinhaça.

3.2 Remoção de DQO

Na digestão anaeróbia, o material orgânico que é representado pelo valor da DQO será convertido em biogás. Assim, a DQO do substrato vai ser decomposto por micro-organismos durante o processo de fermentação no digestor. O valor da percentagem de decomposição da DQO é chamado de remoção de DQO. Neste estudo, o reator UASB apresentou eficiência de remoção de DQO de 71% para carga orgânica volumétrica (COV) aplicada de 2 kg DQO m⁻³ d⁻³ e TDH 11,5 d, mostrando ótima performance no tratamento da vinhaça. Speece (1996) indicou que 1 grama de DQO serão destruídos em 0,395 L de biogás a 35 ° C e 1 atm.

Pugliano et al. (2014), utilizando reatores UASB de 40,5 e 21,5 L, e tratando vinhaça com TDH de 2,8 d e COV de 5,0 a 12,5 g DQOtotal (L d)⁻¹ e operando na faixa de temperatura mesofílica, alcançaram eficiência de remoção de DQO de 54 a 60 %.

BARROS et al. (2016), também operaram reatores UASB utilizando como substrato a vinhaça e obtiveram eficiências médias de remoção de DQOtotal variando de 80 a 82%, com COV 2,5-5,0 g DQO (L d)⁻¹ e TDH de 2,8 a 1,8 dias.

3.3 Produção e Composição do biogás

A Figura 3 mostra a produção de biogás a partir da vinhaça em L/ g DQO. O volume de biogás produzido ao longo do experimento manteve-se na faixa entre 0,5 e 0,6 L /g DQO por dia. Entretanto, verificou-se uma maior produção em 0,9 L/g DQO. Após esse

pico na produção, o volume voltou se estabilizar na faixa de 0,5 L/g DQO e foi diminuindo até o final da operação.

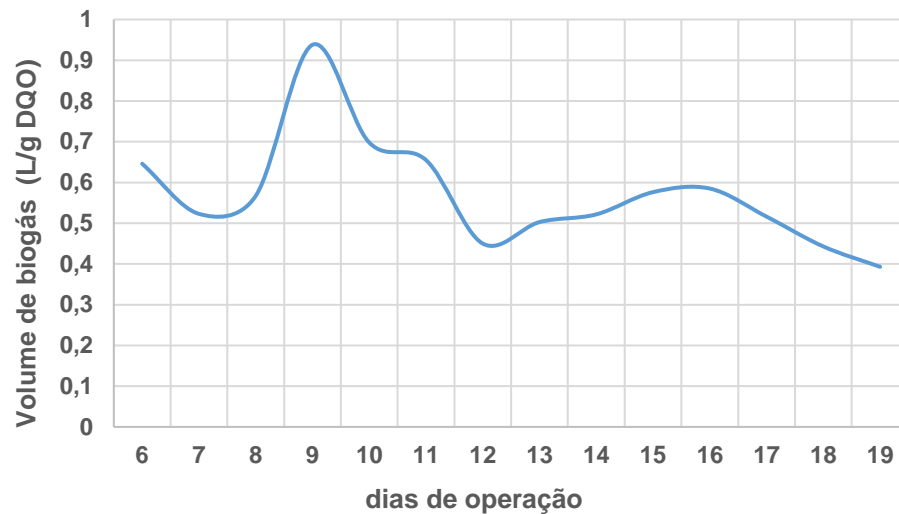


Figura 3. A produção de biogás durante a digestão anaeróbia da vinhaça em reator UASB.

De acordo com Drogg (2013), a composição do biogás é um parâmetro útil para o monitoramento do processo. Uma diminuição no teor de metano pode ser um primeiro sinal de sobrecarga orgânica. Do mesmo modo, um aumento súbito de H_2S pode provocar instabilidade do processo. Na Tabela 2, estão apresentados os componentes quantificados na composição do biogás obtido nesse experimento a partir digestão anaeróbica da vinhaça.

Tabela 2. Composição do biogás obtido da vinhaça utilizada.

Nº de leituras	Teor de metano (CH ₄) (%)	Teor de CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
1	28,1	21,2	9,7	936
2	54,3	38,5	0,6	497
3	56,9	38,4	0,2	682
4	56,4	39,7	0,5	1174
5	57,4	39,4	0,1	1226
6	53,2	35,9	1,2	1191
7	55,4	38	0,3	1281
8	48,2	32,5	2,8	94
9	54,4	37,2	0,4	210

O uso energético do biogás vem basicamente do seu principal componente inflamável, o metano (COIMBRA-ARAÚJO, et al., 2014). Neste trabalho, as porcentagens de metano no biogás cresceram de 28,1 para 54,4% e a partir daí, até o final da operação do reator, as concentrações de metano no biogás manteve-se na faixa de 48 a 57%.

Segundo Pompermayer (2000), no caso de resíduos concentrados como a vinhaça, a proporção de CH_4 no biogás produzido é de 55 a 65%, sendo o restante constituído principalmente por CO_2 . Maiores quantidades de metano implicam menores quantidades de substâncias não combustíveis, tais como a água, o H_2S e o CO_2 , cuja remoção é recomendada, dependendo do tipo de aplicação desejada para o biogás (MAGALHÃES et al., 2004; SALOMON, 2007).

4 CONCLUSÃO

A operação do reator UASB alimentado com vinhaça mostrou-se uma opção para o aproveitamento e tratamento deste resíduo, uma vez que, promove a redução da carga orgânica e, ao mesmo tempo, produz uma energia alternativa através do biogás. Neste experimento, verificou-se uma eficiência de remoção de DQO de 71 % e o volume máximo de 0,9 L/g DQO de biogás acumulado em ao longo dos 15 dias de operação do reator. Durante o experimento, os parâmetros avaliados não mostraram sinais de instabilidade dentro reator, com um pH de cerca de 7,6, temperatura mesofílica na faixa de 32 a 35 °C e FOS/TAC de 0,157- 0,195. Com base nos resultados desta experiência, pode-se deduzir que a vinhaça é uma fonte de potencial para a produção de biogás, e o processo de digestão anaeróbica em reatores UASB apresenta uma solução segura para o tratamento deste tipo de resíduos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standart Methods for the Examination of Water end Wastewater**. 19^a Ed. Washington, D. C., 1995. 1155p. BARROS, V. G. DE; MARIA, R.; OLIVEIRA, R. A. DE. Biomethane production from vinasse in UASB. **Brazilian Journal of Microbiology**, p. 1–12, 2016.

BONCZ, M. A.; FORMAGINI, E. L.; SANTOS, L. DA S.; MARQUES, R. D.; PAULO, P. L. Application of urea dosing for alkalinity supply during anaerobic digestion of vinasse. **Water Science Technology**, v.66, n.11, p.2453, 2012.

BUDIYONO , I. S.; SUMARDIONO, S. Biogas Production Kinetic from Vinasse Waste in Batch Mode Anaerobic Digestion. **World Applied Sciences Journal**, v. 26, n. 11, p. 1464–1472, 2013.

CARRILHO, E.N.V.M.; LABUTO, G.; KAMOGAWA, M.Y. Chapter 2 – Destination of Vinasse, a Residue From Alcohol Industry: Resource Recovery and Prevention of Pollution. **Environmental Materials and Waste**, p. 21–43, 2016.

CHERNICHARO, C. A. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) – UFMG, v. 5, p. 380, 2007.

CORTEZ, L.A.B., FREIRE, W.J., ROSILLO-CALLE, F., Biodigestion of vinasse in Brazil, **Internacional Sugar Journal**, Vol.100, n^o 1196, 1996.

DIN EN 12880:2001-02 (2001a): Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts; Deutsche Fassung EN 12880:2000 [Characterization of sludges – Determination of dry residue and water content; German version EN 12880:2000]. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag.

DIN EN 12879:2001-02 (2001b): Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse; Deutsche Fassung EN 12879:2000 [German standard methods for the characterization of sludges – Determination of the loss on ignition of dry mass]. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag.

DIN 38 409 – part 41, 1980, “Determination of the Chemical Oxygen Demand, COD, in the range over 15 mg/L (H41), Berlin.

DROSG, B. Process monitoring in biogas plants. **International Energy Agency (IEA)**, 2013.

ESPINOZA-ESCALANTE, F.M.; PELAYO-ORTZ, C.; NAVARRO-CORONA, J.; GONZALEZ-GARCA, Y.; BORIES, A.; GUTIERREZ-PULIDO, H. Anaerobic digestion of the vinasses from the fermentation of *Agave tequilana* Weber to tequila: The effect of pH, temperature and hydraulic retention time on the production of hydrogen and methane. **Journal Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 1, p. 14-20, 2009.

JANKE, L.; LEITE, A.; NIKOLAUSZ, M.; SCHMIDT, T.; LIEBETRAU, J. Biogas Production from Sugarcane Waste : Assessment on Kinetic Challenges for Process Designing. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, p. 20685–20703, 2015.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; Pedroso, A. G. Manual básico de biogás. 1ª ed. Lajeado: **UNIVATES**, 2014.

LETTINGA, G.; De Man, A.; Van der Last, A. R. M; Wiegant, W.; Van Knippenberg, K. Anaerobic treatment of domestic sewage and wastewater. **Water Science and Technology**, v. 27, n. 9, p. 67-73, 1993.

LETTINGA, G.; REBAC, S.; ZEEMAN, G. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *Trends in Biotechnology*, 2001.

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

MAGALHÃES, E. A.; SOUZA, S. N. M. DE; AFONSO, A. D. DE L.; RICIERI, R. P. Confecção e avaliação de um sistema de remoção do CO₂ contido no biogás. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 26, n. 1, p. 11-19. 2004.

MÉZES, L.; TAMAS, J.; BORBELY, J. Novel approach of the basis of FOS / TAC method. **International Symposia "Risk Factors for Environment and Food Safety" & "Natural Resources and Sustainable Development" & "50 Years of Agriculture Researche in Oradea"**, Faculty of Environmental Protection, p. 803–807, 2011.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil_ Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, 2015.

NORDMANN, W., 1977, Die Überwachung der Schlammfäulung. KA-Informationen für das Betriebspersonal, Beilage zur Korrespondenz Abwasser, 3/77.

NGUYEN, D.; GADHAMSHETTY, V.; NITAYAVARDHANA, S.; KHANAL, S. K. Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 193, p. 513–522, 2015.

POMPERMAYER, R. S.; PAULA, JR. D.R. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. *Encontro de Energia no Meio Rural*, 3, 2000.

PUGLIANO, L. M.; BARROS, V. G. DE; DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. De. Produção de biogás a partir da vinhaça e biogas production from molasses and using vinasse. **Ciência & Tecnologia: Fatec-JB**, v. 6, n. L, p. 49–53, 2014.

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. Itajubá. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SILES, J.A.; GARCÍA-GARCÍA, I.; MARTÍN, A.; MARTÍN, M.A. Integrated ozonation and biomethanization treatments of vinasse derived from ethanol manufacturing. **Journal of Hazardous Materials**, v. 188, n. 1–3, p, 247–253, 2011.

SPEECE, R . E. Anaerobic technology for industrial waste waters,USA, **Archae Press**, (1996).

UNICA. Sugar Cane's Energy – Twelve studies on Brazilian sugar cane agribusiness and its sustainability, 2nd edition. São Paulo: **Berlendis & Vertecchia**, 2007.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2005.

VOß E., Weichgrebe D., Rosenwinkel, K. H., 2009, FOS/TAC-Deduction, Methods, Application and Significance, **Internationale Wissenschaftskonferenz, Biogas Science 2009 – science meets practice**”, LfL-Bayern, 2-4. 12.09, Erding.

WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J.; OWENS, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 63-102. 2000.

CAPÍTULO 3

*PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO
ANAERÓBICA DE EFUENTES DE LATICÍNIOS EM REATOR
UASB*

TUNES, C. R.; SILVA, A. R.; BIS, D. P.; PORTELLA, A. C. F.; CHAGAS JR., A. F.; SCHEIDT, G. N. Produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de efluentes de laticínios em reator UASB. **International Journal of Current Research**, v. 8, n. 10, p. 39651-39654, 2016.

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE EFUENTES DE LATICÍNIOS EM REATOR UASB

RESUMO

A digestão anaeróbica de materiais orgânicos e poluentes é uma tecnologia estabelecida para a proteção do ambiente através do tratamento de resíduos e de águas residuais industriais. O biogás é o produto final gerado desse processo e é considerado como uma fonte renovável de energia. Indústrias de laticínios, como a maioria das outras agroindústrias, gera grandes vazões de efluentes resistentes, caracterizados por alta demanda biológica de oxigênio (DBO) e concentrações de demanda química de oxigênio (DQO). Os efluentes de laticínios são considerados um dos principais responsáveis pela poluição causada por essas indústrias. O objetivo deste trabalho foi o estudo do reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) para o tratamento de efluentes de laticínios e produção de biogás. Dentre os relatos de tratamentos anaeróbios em resíduos líquidos lácteos, reatores do tipo UASB são utilizados. A eficiência do reator a partir da taxa de carga orgânica de $6 \text{ Kg COD m}^{-3} \text{ d}^{-3}$ e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 11,8 foi estudada e seu desempenho foi avaliado pelo monitoramento do pH, DQO, relação de alcalinidade FOS/TAC e produção de biogás. Observou-se a eficiência de remoção de DQO em 71,3 %. O pH do reator foi verificado entre 7.0-7.3 e o valor de FOS/TAC entre 0,129-0,152. A produção média de biogás foi observada em 85,8 litros por dia, e o volume específico de biogás entre 0,46-0,71 L /g DQO por dia. O conteúdo de metano no biogás produzido, observou-se o valor máximo e mínimo em 56,6 % e 40 %, respectivamente.

Palavras-Chave: tratamento anaeróbico; biogás; efluentes lácteos; reator UASB.

BIOGAS PRODUCTION FROM ANAEROBIC DIGESTION OF DAIRY WASTEWATER IN UASB REACTOR

ABSTRACT

The anaerobic digestion of organic materials and pollutants waste is an established technology for environmental protection through the treatment waste and industrial wastewater. The end product is biogas generated in this process and is considered a renewable energy source. Dairy industries, like most other agro industries, generates large flows of wastewater resistant, characterized by high biological oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand concentrations (COD). Dairy wastewater are considered a major contributor to the pollution caused by these industries. The aim of this work was to study the UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) for the treatment of dairy wastewater and biogas production. Among the reports of anaerobic treatment in dairy liquid waste, UASB reactors are used. The reactor efficiency as from the organic loading rate of $6 \text{ kg COD m}^{-3} \text{ d}^{-3}$ and hydraulic retention time (HRT) of 11.8 was studied and its performance was evaluated by monitoring the pH, COD, alkalinity ratio FOS / TAC and biogas production. It was observed COD removal efficiency of 71.3%. The pH of the reactor was observed between 7.0-7.3 and the amount of FOS / TAC between 0.129 to 0.152. The average biogas production was observed in 85.8 liters per day, and the specific volume of biogas from 0.46 to 0.71 L / g COD per day. The methane content of the biogas produced, observed maximum and minimum value of 56.6% and 40%, respectively.

Keywords: anaerobic treatment; biogas; dairy effluent; UASB reactor.

1 INTRODUÇÃO

A produção e utilização de biogás é normalmente vista como uma opção promissora de geração de energia limpa e sustentável, que pode atender às necessidades globais de energia e proporcionando vários benefícios ambientais, como a redução significativa das emissões de gases causadores do efeito estufa.

O biogás pode ser produzido a partir da digestão anaeróbia de quase todos os tipos de materiais biológicos decorrentes dos setores agrícolas primários e de vários fluxos de resíduos orgânicos industriais e domésticos (AGOSTINI et al., 2015). Dentre as atividades industriais, as indústrias de laticínios se destacam como grandes geradoras de resíduos orgânicos.

A indústria de laticínios, como a maioria das outras agroindústrias, gera grandes vazões de efluentes resistentes, caracterizados por alta demanda biológica de oxigênio (DBO) e concentrações de demanda química de oxigênio (DQO), representando seu alto teor de matéria orgânica (DEMIREL et al., 2005). Durante todas as etapas de produção são gerados os efluentes líquidos industriais, resíduos sólidos e as emissões atmosféricas, que sem o devido controle e mitigação, possuem potencial de geração de impactos ambientais associados à atividade. Os efluentes líquidos do setor de laticínios abrangem ainda os esgotos gerados nos sanitários, refeitório e lavanderia da indústria (FIEMG, 2016).

A descarga de efluentes industriais é considerada o principal impacto ambiental do setor de laticínios, pois além da alta concentração de matéria orgânica, os efluentes apresentam altos teores de óleos e graxas, e se caracterizam pela presença de sólidos suspensos e odor originado pela decomposição da caseína. O pH é praticamente neutro, mas tende a acidificar devido ao uso de ácido nas operações de limpeza e à fermentação láctea dos resíduos e sua posterior conversão em ácido lático (MAGANHA, 2006).

Devido as elevadas concentrações de matéria orgânica residual, considera-se como atitude necessária à implementação de sistemas de tratamento viáveis e com maior potencial de recuperação. Neste cenário, a adoção de processos de digestão anaeróbia em estações de tratamentos de efluentes de indústrias de laticínios, destacam-se como

o método biológico mais adequado para o tratamento ou pré-tratamento dos efluentes residuais gerados (RICO et al., 2015).

Aplicação da digestão anaeróbia tem aumentado ao longo dos anos como uma tecnologia de tratamento que é aplicável a efluentes de alta resistência, sem consumo de energia, estabilização da matéria orgânica e a produção de biogás, que pode ser utilizado como uma fonte de energia renovável na própria indústria. Dentre os relatos de tratamentos anaeróbios em efluentes de laticínios, reatores anaeróbicos de alta taxa do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) são utilizados (PASSEGGI et al., 2012). Segundo Totzke (2004), o reator UASB é a configuração mais promissora para o tratamento de vários tipos de resíduos líquidos.

Em reatores tipo UASB, os microorganismos são principalmente agrupados em grânulos e flocos formados por auto-agregação de bactérias e archaeas metanogênicas. Os grânulos são aglomerados compactos que se acumulam em grandes quantidades no reator possuem alta atividade metanogênica específica e sedimentação. Estas formações dependerão muito do fluxo ascendente e composição das águas residuais (BARROS et al., 2016). Segundo Zhao et al. (2008), os reatores UASB apresenta ainda características positivas, tais como a sua capacidade de lidar com altas cargas de substrato e curtos tempos de retenção hidráulica.

Com isso, considerou neste trabalho, a aplicação da tecnologia de digestão anaeróbia no tratamento dos resíduos líquidos de uma indústria laticínios utilizando o reator do tipo UASB.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O sistema anaeróbio para o tratamento e produção de biogás a partir de efluentes líquidos de uma indústria de laticínios foi implementado no Laboratório de Bioenergia para a gestão de resíduos e de bioenergia da Universidade de Rostock, Alemanha. A duração da experiência foi de 51 dias.

Os resíduos líquidos lácteos usados como substrato para este estudo foram fornecidos por uma indústria de laticínios, localizada na cidade de Upahl (Mecklenburg-Vorpommern, Alemanha). Esta indústria de laticínio fabrica uma variedade de produtos lácteos, tais como iogurtes, manteigas, queijos, leites e dentre outros. Os resíduos lácteos eram transportados para o laboratório e armazenados a 4 °C até o seu uso. Antes de serem usados para total alimentação do reator anaeróbio, amostras desse substrato foram submetidas a análises e suas características físico-químicas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do substrato lácteo utilizado neste estudo.

Parâmetros	Unidade	Valores
DQO	(mg/ L)	65000
P tot.	(mg/ L)	842
NO ₃ -N	(mg/ L)	5,24
NH ₄ -N	(mg/ L)	67
N tot.	(mg/ L)	786
pH	(mg/ L)	4,53
Ca	(mg/ L)	1680
Cl	(mg/ L)	932
MS	(% da massa total)	5,30
SV	(% da massa total)	4,50
SV	(% total de MS)	83,70
Ácido láctico	(mg/ L)	12000
Etanol	(mg/ L)	31,40
Ácido acético	(mg/ L)	1165,5

Ácido butírico	(mg/ L)	21,33
----------------	---------	-------

Observações: DQO, demanda química de oxigênio; MS, matéria seca; SV, sólidos voláteis.

Para este estudo foi usado um reator UASB cilíndrico com um diâmetro de 0,3 m, área de seção transversal de 0,0707 m² e um volume útil de trabalho de aproximadamente 85 litros, construído a partir de vidro e coberto com um separador trifásico. O reator UASB consiste basicamente de três partes fundamentais em sua coluna ascendente: leito de lodo; zona de sedimentação; e o separador trifásico que é um dispositivo colocado na parte superior do reator. O separador gás-líquido-sólido é um dispositivo que tem por finalidade dividir a zona de digestão, onde se encontra a manta de lodo responsável pela digestão anaeróbia e a zona de sedimentação (HAMERSKI, 2012).

O lodo proveniente de um reator anaeróbio industrial utilizado no tratamento de resíduos de uma plantação de batatas foi usado como inóculo para este estudo. Após inoculação, a alimentação do reator foi realizada pela parte inferior do reator por meio de uma bomba peristáltica e o efluente deixou o reator por meio de um tubo de saída na parte superior do reator. O sistema de alimentação consistia em um recipiente de plástico de 10 L, que era abastecido diariamente com o efluente mantido em geladeira a 4°C. Tal recipiente de alimentação era mantido à temperatura ambiente sobre um agitador magnético para evitar eventual sedimentação de sólidos.

O reator UASB foi alimentado em modo de operação intermitente com 12 períodos de alimentação por dia e com tempo de operação da bomba de alimentação durante 1 minuto para cada período. O reator UASB foi operado a um tempo de detenção hidráulica de 11,8 dias, taxa de vazão de 7,85 L d⁻¹, taxa de carga orgânica de 6 Kg COD m⁻³ d⁻³ e temperatura mantida na faixa mesofílica de 28 a 30 °C, através de água aquecida ao redor do reator e espuma isolante.

O volume de biogás gerado no reator UASB foi medida por meio de um dispositivo medidor de biogás instalado junto ao topo do reator para medir a produção de biogás diário. O volume de biogás era quantificado a cada 30 minutos por dia. Para o armazenamento do biogás produzido, foram confeccionadas sacolas de material metalizado que foram conectadas ao medidor de vazão de biogás. A leitura da composição do biogás foi feita através do Software (método) Visit 3.

2.1 Métodos analíticos

A estabilidade do processo anaeróbio em relação a alcalinidade do meio pode ser avaliada, quer através do conhecimento dos parâmetros individuais de ácidos orgânicos voláteis e capacidade tampão ou por meio da relação destes parâmetros (MÉZES et al., 2011). Neste estudo, aplicou-se o método FOS/TAC, a relação de ácidos orgânicos voláteis (FOS) e a capacidade tampão (TAC), segundo o método de Nordmann (1977).

Outros parâmetros analisados durante o experimento foram pH, temperatura e DQO (DIN 38 409-H41-1, 1980). O volume de biogás produzido e conteúdo de metano do biogás foram determinadas diariamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de digestão anaeróbia pode ser extremamente influenciado por diversos fatores ambientais tais como, temperatura, pH e alcalinidade. Dessa forma, é importante proporcionar condições ambientais favoráveis para as populações microbianas dentro dos reatores anaeróbicos para assegurar que o processo de digestão ocorra de uma maneira estável.

Neste estudo, o reator UASB manteve-se estável durante todo o experimento em relação aos de valores de pH e temperatura. A temperatura permaneceu na faixa mesofílica fixada no início do experimento, não havendo oscilações fora dessa faixa. De acordo com Powar et al. (2013). A taxa de degradação de materiais orgânicos é melhorada em temperaturas mesófilas.

Segundo Lettinga e Haandel (1993), as primeiras etapas de digestão anaeróbica podem ocorrer numa vasta gama de valores de pH, enquanto que a metanogênese procede somente quando o pH é neutro. O valor de pH verificado durante o experimento permaneceu na faixa de 7,0-7,3. Estes valores estão de acordo com os valores de pH observados em outros trabalhos para o tratamento de efluentes de laticínios em reatores UASB (KAVITHA et al., 2013; TAWFIK, 2008). Para valores de pH fora do intervalo de 6,5-7,5, a taxa de produção de metano é menor (MES et al., 2003).

O controle da relação de alcalinidade do sistema de degradação é extremamente importante, uma vez que, o aumento demasiado de ácidos orgânicos e a baixa capacidade de tamponamento pode causar um colapso no processo de digestão anaeróbia. Aplicando o método FOS/TAC a estabilidade do processo de degradação anaeróbia foi determinada facilmente. O valor de FOS/TAC neste estudo foi observado entre 0,129-0,152. Este valor está de acordo com os resultados de Voß E. et al. (2009), que determinou intervalo ideal entre 0,15 e 0,45. Segundo Drosch (2012), a relação de alcalinidade abaixo de 0,3 são, em geral, considerados como indicador de processos estáveis.

O teste de demanda química de oxigênio (DQO) foi utilizado para quantificar a quantidade de matéria orgânica no substrato lácteo e prever o potencial de produção de biogás. A DQO do efluente de entrada no reator UASB foi de 68900 mg/L e a DQO depois

de deixar o reator variou entre valores de 10500-16600 mg / L durante o experimento. A eficiência do reator UASB operado neste estudo em termos da remoção de DQO, foi de 71,3 %. Kavitha et al. (2013), em seu estudo sobre a avaliação de desempenho e tratamento biológico de efluentes de laticínios em reator do tipo UASB, verificou a eficiência do desempenho do reator em 76,9%. Já, Gotmare et al. (2013), estudou a “Biometanização de efluentes de laticínios em reator UASB na faixa de temperatura mesofílica”, e observou que a eficiência do reator em termos de DQO foi de 87, 06%.

Ao longo da duração deste estudo verificou-se o valor médio de produção de biogás a partir de efluentes lácteos em 85,8 litros por dia. O volume específico de biogás produzido oscilou entre 0,46-0,71 L /g DQO por dia. Em relação ao conteúdo de metano no biogás produzido, observou-se o valor máximo e mínimo em 56,6 % e 40 %, respectivamente (Figura 1).

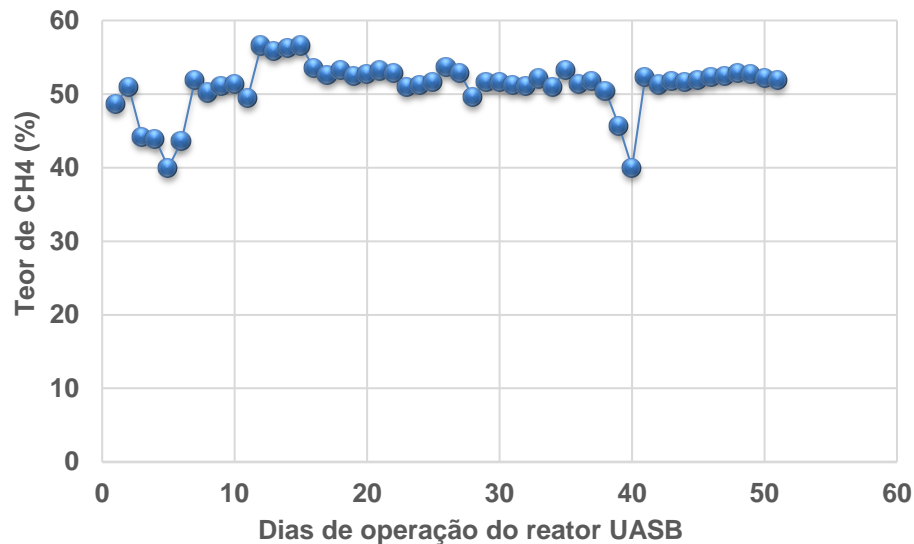


Figura 1. Conteúdo de CH₄ no biogás produzido a partir de efluentes lácteos.

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, a digestão anaeróbica de águas residuais de laticínios em reator do tipo UASB foi avaliada. Os resultados obtidos mostraram o bom desempenho do reator UASB para esse tipo de resíduo, alcançando uma eficiência de remoção de DQO em 71,3 %. O volume específico de biogás foi observado na faixa de 0,46-0,71 L /g DQO por dia com o conteúdo de metano em torno de 56,6 e 40 % no biogás. Os valores de pH e temperatura mantiveram-se estáveis ao longo do experimento, não operando fora da faixa ótima para este tipo de processo em reator UASB. O valor de FOS/TAC encontrado neste estudo foi entre 0,129-0,152. Este valor está de acordo com os valores mostrados na literatura, o que confirma a estabilidade do processo. Com base nos resultados alcançados, o reator UASB teve um desempenho satisfatório para o tratamento e produção de biogás.

Assim, esta tecnologia de tratamento biológico pode ser considerada como uma importante ferramenta para o tratamento de águas residuais poluídas e, conseqüentemente, na produção de uma energia renovável.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINI, A.; BATTINI, F.; GIUNTOLI, J.; TABAGLIO, V.; PADELLA, M.; BAXTER, D.; MARELLI, L.; AMADUCCI, A. Environmentally Sustainable Biogas? The Key Role of Manure Co-Digestion with Energy Crops. **Energies**, v. 8, 2015.

BARROS, V. G. DE; MARIA, R.; OLIVEIRA, R. A. DE. Biomethane production from vinasse in UASB. **Brazilian Journal of Microbiology**, p. 1–12, 2016.

DEMIREL, B.; YENIGUN, O.; ONAY, T. T. Anaerobic treatment of dairy wastewaters : A review. **Process Biochemistry**, v. 40, p. 2583–2595, 2005.

DIN 38 409 – part 41, 1980, “Determination of the Chemical Oxygen Demand, COD, in the range over 15 mg/L (H41), Berlin.

DROSG, B. Process monitoring in biogas plants. **International Energy Agency (IEA)**, 2013.

FIEMG-Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. Guia técnico ambiental da indústria de laticínios. Minas Gerais: **FIEMG, 2016**. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIEN_TAIS/guia_laticinios.pdf. Acesso em 20 de jun. de 2016.

GOTMARE MONALI, DHOBLE R. M. AND PUTTULE A. P. “Biomethanation of dairy wastewater through UASB at mesophilic temperature range”. **International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies**, v.8, n. 1, p.001-009, 2011.

HAMERSKI, F. **Fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) no tratamento de efluentes**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processo)- Universidade de Santa Maria, 2012.

KAVITHA, R. V.; KUMAR, S.; SURESH, R.; KRISHNAMURTHY, V. Performance evaluation and biological treatment of dairy waste water treatment plant by upflow anaerobic sludge blanket reactor. **International Journal of Chemical & Petrochemical**, v. 3 , n. 1, 2013.

LETTINGA, G. and A.C. HAANDEL, **Anaerobic digestion for energy production and environmental protection, in Renewable energy; Sources for fuels and electricity**. T.B. Johansson, et al., Editors. 1993, Island press, California: London. p. 817-839.

MAGANHA, M. F. B. (2006). Guia técnico ambiental da indústria de produtos lácteos. São Paulo: CETESB. 95 p. Série Produção + Limpa. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/producao_limpa/laticinio.pdf. Acesso em: 24 de jun. 2016.

MES, T.Z.D. de; STAMS, A.J.M.; ZEEMAN, G. (2003): Chapter 4. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. In: REITH, J.H. (Editor); WIJFFELS, R.H. (Editor); BARTEN, H. (Editor) (2003): **Biomethane and Biohydrogen**. Status and perspectives of biological methane and hydrogen production. p. 58-94, 2003.

MÉZES, L.; TAMAS, J.; BORBELY, J. Novel approach of the basis of FOS / TAC method. **International Symposia "Risk Factors for Environment and Food Safety" & "Natural Resources and Sustainable Development" & "50 Years of Agriculture Researche in Oradea"**, Faculty of Environmental Protection, p. 803–807, 2011.

NORDMANN, W., 1977, Die Überwachung der Schlammfäulung. KA-Informationen für das Betriebspersonal, Beilage zur Korrespondenz Abwasser, 3/77.

PASSEGGI, M.; LÓPEZ, I.; BORZACCONI, L. Modi fi ed UASB reactor for dairy industry wastewater : performance indicators and comparison with the traditional approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 26, p. 90–94, 2012.

POWAR, M. M.; KORE, V.S.; KORE, S. V.; KULKARNI, G. S. Review on applications of uasb technology for wastewater treatment. **International Journal of Advanced Science, Engineering and Technology**, v. 2, n. 2, p. 125–133, 2013.

RICO, C.; Muñozb, N.; Fernández, J.; Rico, J. L. 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**, v. 262, p. 794–802, 2015.

TAWFIK, A; Sobheyb, M.; Badawy M. Treatment of a Combined Dairy and Domestic Wastewater in an Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor Followed by Activated Sludge (AS System) Treatment of a combined dairy and domestic wastewater in an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor followed by activated sludge (AS system). **Desalination**, v. 227, p. 167– 177, 2008.

TOTZKE, D. Anaerobic treatment in the dairy industry. Proc. 1992 **Food Ind. Environ. Conf.**, p. 3–16, 1992.

VOß E., Weichgrebe D., Rosenwinkel, K. H. FOS/TAC-Deduction, Methods, Application and Significance, Internationale Wissenschaftskonferenz, Biogas Science 2009 – science meets practice", **LfL-Bayern**, 2-4. 12.09, Erding, 2009.

ZHAO, B.; YUE, Z.; ZHAO, Q.; MU, Y.; YU, H.; HARADA, H.; LI, Y. Optimization of hydrogen production in a granule-based UASB reactor. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 10, p. 2454–2461, 2008.

CONCLUSÃO GERAL

Os resultados obtidos neste trabalho, mostraram um bom funcionamento do reator do UASB e os substratos utilizados foram eficientes para a produção de biogás.

O reator UASB tem se mostrado o reator mais adequado para a biodigestão de efluentes com elevadas concentrações de materiais orgânicos, pois está associado a inúmeras vantagens que o sobressai em relação aos reatores anaeróbios convencionais.

Com a biodigestão anaeróbica da vinhaça, este estudo obteve-se uma eficiência de remoção de DQO de 71% e volume de biogás acumulado de 1160 litros com concentração de metano em torno de 48 a 57 %.

Usando o efluente de lácteo observou-se a eficiência de remoção de DQO em 71,3 %. A produção média de biogás foi observada em 85,8 litros por dia, e o volume específico de biogás entre 0,46-0,71 L /g DQO por dia. O conteúdo de metano no biogás produzido, observou-se o valor máximo e mínimo em 56,6 % e 40 %, respectivamente.

Como conclusão final, a digestão anaeróbica de resíduos orgânicos destaca-se como sendo uma tecnologia eficiente e sustentável que associa benefícios econômicos e ambientais, com geração de energia “verde”, tratamento de resíduos poluentes e produção de fertilizantes, entre outros.