



**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS**  
**AMBIENTAIS – PPGECAM**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**FABRÍCIO HOELTZ STEFFENS**

**PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE**  
**VINHOTO E GLICEROL RESIDUAIS**

**Caxias do Sul, RS**

**2016**



**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS**  
**AMBIENTAIS – PGECA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**FABRÍCIO HOELTZ STEFFENS**

**PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE**  
**VINHOTO E GLICEROL RESIDUAIS**

Dissertação apresentada no Curso de Mestrado Profissional em Engenharia e Ciências Ambientais da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Gestão e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Lademir Luiz Beal

**Caxias do Sul, RS**

**2016**

F126p Fabrício Hoeltz, Steffens

PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHOTO E GLICEROL RESIDUAIS : PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHOTO E GLICEROL RESIDUAIS / Steffens Fabrício Hoeltz – 2016.  
93 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, 2016.

Orientação: Beal Lademir Luiz.

1. anaeróbio; vinhoto; glicerol; reatores; metano. I. Lademir Luiz, Beal, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UCS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**FABRÍCIO HOELTZ STEFFENS**

**PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE  
VINHOTO E GLICEROL RESIDUAIS**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Ambientais. Área de Concentração: Gestão e Tecnologia Ambiental.  
Orientador: Prof. Dr. Lademir Luiz Beal

**Aprovado em 21 de dezembro de 2016.**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Dra. Suelen Osmarina Paesi  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Dra. Eloane Malvessi  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Dr. Mário Takayuki Kato  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esta dissertação aos meus pais, Pedro e Tânia, pelo amor incondicional e pelo incessante incentivo aos meus estudos.

À minha irmã Andréia, pelo amor e proteção ao longo da minha vida.

À minha amada esposa Juliana, pela paciência, carinho e dedicação nos momentos mais difíceis.

Ao nosso querido e amado Adolpho, pelo companheirismo e lealdade dignos dos melhores cães.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Dr. Lademir Luiz Beal, pela constante orientação, ensinamentos e auxílios necessários para a realização deste trabalho.

Agradeço a toda a equipe do Laboratório de Tecnologia Ambiental (LATAM) da Universidade de Caxias do Sul, em especial Juliane Azevedo.

Por fim, agradeço a todos os professores que agregaram ao meu desenvolvimento e aprendizado e que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação.

## RESUMO

Levando-se em consideração a importância econômica que a indústria sucroalcooleira e do biodiesel representam para o Brasil, bem como a posição de destaque do país neste cenário econômico mundial, uma gestão adequada do efluente gerado pelas indústrias torna-se fundamental. A fim de minimizar os impactos ambientais associados, tendo em vista que um litro de etanol produzido gera até quinze litros de vinhoto e que cada tonelada de biodiesel gera cem quilos de glicerol, tecnologias disponíveis podem ser utilizadas, como no caso de processos anaeróbios. Este estudo avaliou doze experimentos em processo anaeróbio em escala laboratorial utilizando efluente de vinhoto e glicerol pós tratamento por processo de acidogênese, oriundo da indústria sucroalcooleira e do biodiesel. Foram determinados parâmetros de produção de metano, entre outros aspectos. Os três reatores dos quatro experimentos que apresentaram resultados mais significativos em termos de produção de metano no período de tempo monitorado, utilizando somente vinhoto residual, foram o V4.3, V2.3 e o V3.3, em volumes de 6.241 mL, 6.087 mL e 4.845 mL, respectivamente. Já nos experimentos utilizando também glicerol, os resultados apresentaram produções máximas de metano de 8.687 mL, 7.990 mL e 6.640 mL, para relações de proporções de vinhoto e glicerol de 80/20, 60/40 e 20/80, respectivamente.

**Palavras-chaves: anaeróbio; vinhoto; glicerol; reatores; metano.**

## ABSTRACT

Taking into account the economic importance that the sugar-alcohol industry and biodiesel represent for Brazil, as well as the country's leading position in this world economic scenario, adequate management of the effluent generated by the industries becomes fundamental. In order to minimize the associated environmental impacts, given that one liter of ethanol produced generates up to fifteen liters of vinasse and that each ton of biodiesel generates one hundred kilos of glycerol, available technologies can be used, as in the case of anaerobic processes. This study evaluated twelve experiments in anaerobic process in laboratory scale using effluent of vinasse and glycerol post treatment by acidogenesis process, coming from the sugar-alcohol industry and biodiesel. Methane production parameters were determined, among other aspects. The three reactors of the four experiments that presented the most significant results in terms of methane production in the monitored time period, using only residual vinasse, were V4.3, V2.3 and V3.3, in volumes of 6,241 mL, 6,087 mL and 4,845 mL, respectively. In the experiments using also glycerol, the results presented maximum methane yields of 8,687 mL, 7,990 mL and 6,640 mL, for vinasse and glycerol ratios of 80/20, 60/40 and 20/80, respectively.

**Keywords: anaerobic; vinasse; glycerol; reactors; methane.**



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Fases da digestão anaeróbia na produção de biogás. ....	29
FIGURA 2 - Teores de metano contidos no biogás produzido durante as estações de verão, outono, inverno e primavera, em biodigestores abastecidos com substratos de dejetos de caprinos. ....	30
FIGURA 3 - Três reatores instalados para os ensaios laboratoriais.....	41
FIGURA 4 - Detalhe da proveta invertida e do recipiente com água pH 12. ....	42

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Equivalência energética do biogás comparado a outras fontes de energia	26
TABELA 2 - Composição do substrato dos experimentos e DQO inicial.....	43
TABELA 3 - Dados relativos ao experimento V1, com amostra bruta DQO de 11.140 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	45
TABELA 4 - Dados relativos ao experimento V2, com amostra bruta DQO de 16.847 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	45
TABELA 5 - Dados relativos ao experimento V3, com amostra bruta DQO de 16.167 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	45
TABELA 6 - Dados relativos ao experimento V4, com amostra bruta DQO de 21.440 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	45
TABELA 7 - Dados relativos ao experimento VG1, com amostra bruta DQO de 17.142 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	45
TABELA 8 - Dados relativos ao experimento VG2, com amostra bruta DQO de 18.522 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	46
TABELA 9 - Dados relativos ao experimento VG3, com amostra bruta DQO de 16.764 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	46
TABELA 10 - Dados relativos ao experimento VG4, com amostra bruta DQO de 15.888 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	46
TABELA 11 - Dados relativos ao experimento VG5, com amostra bruta DQO de 16.380 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	46
TABELA 12 - Dados relativos ao experimento VG6, com amostra bruta DQO de 16.052 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	46
TABELA 13 - Dados relativos ao experimento VG7, com amostra bruta DQO de 21.035 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	47
TABELA 14 - Dados relativos ao experimento VG8, com amostra bruta DQO de 11.633 mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> .....	47

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	11
2 JUSTIFICATIVA .....	14
3 OBJETIVOS .....	15
3.1 OBJETIVO GERAL .....	15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
4 REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
4.1 LICENCIAMENTO AMBIENTAL.....	16
4.2 PANORAMA DA PRODUÇÃO SUCROALCOOLEIRA.....	17
4.3 ATIVIDADE SUCROALCOOLEIRA E A GERAÇÃO DE ENERGIA .....	21
4.4 PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DA ATIVIDADE SUCROALCOOLEIRA ....	23
4.5 UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	24
4.6 FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	26
<b>4.6.1 Fases da digestão anaeróbia .....</b>	<b>27</b>
<b>4.6.2 Temperatura.....</b>	<b>29</b>
<b>4.6.3 Alcalinidade e pH .....</b>	<b>31</b>
<b>4.6.4 Ácidos voláteis .....</b>	<b>31</b>
<b>4.6.5 Sulfato .....</b>	<b>33</b>
<b>4.6.6 Redução de enxofre por bactérias.....</b>	<b>34</b>
4.7 BIOMASSA NOS SISTEMAS ANAERÓBIOS .....	34
4.8 DIGESTÃO ANAERÓBIA EM REATORES APLICADOS A ATIVIDADE SUCROALCOOLEIRA E DO BIODIESEL.....	36
4.9 POTENCIAL ECONÔMICO DO BIOGÁS GERADO NOS BIODIGESTORES ANAERÓBIOS.....	38
5 METODOLOGIA.....	41
5.1 UNIDADE EXPERIMENTAL.....	41
5.2 AVALIAÇÃO DE PRODUÇÃO DE METANO .....	42
5.3 CINÉTICA DE PRODUÇÃO DE METANO .....	47
5.4 ANÁLISES PARA MONITORAMENTO .....	47
<b>5.4.1 Análise da composição de gases .....</b>	<b>48</b>
<b>5.4.2 Análise de sólidos totais, DQO e pH.....</b>	<b>49</b>
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50

6.1 ARTIGO I- PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE VINHOTO COMO PÓS TRATAMENTO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO .....	51
6.2 ARTIGO II - PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHOTO E GLICEROL.....	65
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81
ANEXOS .....	89

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos tem se tornado um dos graves problemas ambientais enfrentados atualmente em nível mundial e, em especial, nas cidades de elevado desenvolvimento econômico, industrial e tecnológico. Os problemas de ordem ambiental têm início nos hábitos e modo de vida da população e são agravados pelo fato de muitos resíduos não serem biodegradáveis e, ademais, por alguns destes não poderem ser reutilizados ou reciclados. Ainda, existem aqueles resíduos que são degradados naturalmente, porém são gerados em quantidades tais que, até serem degradados pelo ambiente, promovem impactos ambientais negativos, a exemplo dos resíduos provenientes da atividade sucroalcooleira.

O setor sucroalcooleiro constitui o principal agronegócio brasileiro. Na safra 2005/2006, a moagem foi de 431,4 milhões de toneladas de cana, que resultou na produção de 26,7 milhões de toneladas de açúcar e 17 bilhões de litros de álcool. Em 2006, o parque sucroalcooleiro nacional possuía 320 indústrias em atividade, sendo 227 na região Centro-Sul e 94 na região Norte-Nordeste, que impulsionavam a atividade econômica de mais de 1.000 municípios brasileiros. Havia, ainda, no país, perto de 30 projetos em fase de implantação, segundo dados do Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos (DIEESE, 2007). Conforme prevê a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), para a safra 2016/2017 são projetadas 684,77 milhões de toneladas de cana, representando acréscimo de 2,9% em relação a safra anterior e um aumento de 58,73% sobre a safra 2005/2006. Já, a quantidade de indústrias aumentou para 371, representando um aumento de 16%.

Segundo Andrade e Diniz (2007), o setor sucroalcooleiro é perdulário no uso da água; emprega grande número de caldeiras tecnologicamente ultrapassadas; subaproveita o potencial disponível de co-geração de energia elétrica; consome grandes quantidades de insumos químicos agressivos ao meio ambiente (óleo diesel, soda cáustica, óleos lubrificantes e graxas não biodegradáveis) e queima a maior parte da cana colhida.

Por outro lado, apesar da tecnologia associada ao setor industrial ainda proporcionar à humanidade determinados produtos sem prognósticos quanto à destinação final adequada, também oferece ferramentas que podem mitigar os

impactos ambientais das atividades, como no caso de sistemas para tratamento de efluentes da indústria sucroalcooleira, no caso, o vinhoto.

Neste contexto, existem estudos acerca da efetivação de reatores anaeróbios em propriedades rurais, os quais podem ser definidos como sistemas que visam a produção de biogás, através da digestão de matéria orgânica. Além do biogás que é gerado neste sistema, existe uma fração sólida residual que também pode ser aproveitada, chamada de biofertilizante, podendo ser utilizada como adubo para culturas agrícolas.

Segundo o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB, 2001), os reatores do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) representam tecnologia anaeróbia para tratamento direto de águas residuárias, sejam de natureza simples ou complexa, de baixa ou alta concentração, solúveis ou com material particulado. No reator UASB, a imobilização dos microrganismos ocorre por meio de auto-adesão, formando flocos ou grânulos densos, suspensos, que se dispõem em camadas de lodo a partir do fundo do reator.

O vinhoto resultante do processo de produção do álcool é um resíduo de potencial contaminação ambiental, pois cada litro de álcool produzido gera dez a quinze litros de vinhoto (FERRAZ et al., 2000). Caracterizado por ser um líquido de odor forte, coloração marrom-escuro, baixo pH, alto teor de potássio e com alta demanda química de oxigênio (DBO), ou seja, com alta carga de matéria orgânica contida no efluente, torna-se um material altamente poluidor.

No Brasil, a aplicação final mais comum do vinhoto ocorre através da fertirrigação de culturas agrícolas, onde este é utilizado para satisfazer requisitos de fertilização potássica e contribuir com outros nutrientes essenciais. A produção de biogás através do vinhoto emergiu como um uso alternativo adicional para este efluente, com um duplo propósito: produção de bioenergia e produção de um resíduo com potencial de fertilização (UENO, et al., 2014).

Outro agronegócio com crescente importância na economia brasileira é a produção de biodiesel tendo como matéria-prima o óleo de soja. A produção de biodiesel através da reação de transesterificação de triglicerídeos com metanol ou etanol tem produzido nos últimos anos uma quantidade enorme de glicerol como subproduto (MELERO et al., 2012). Estimativas da produção sugerem que, volumetricamente, para cada 90 m<sup>3</sup> de óleo produzido, 10 m<sup>3</sup> de glicerol são gerados. Processos e usos dessa enorme quantidade de glicerol são disponíveis. A

incineração ou a queima em fornos industriais é um dos processos mais comuns através do qual elimina-se uma grande quantidade dos estoques de glicerol disponíveis. Contudo, existem muitas aplicações ou usos que evitam a incineração do glicerol cru como única alternativa de redução dos estoques (ZHOU et al., 2008). Uma das alternativas é o uso do glicerol em processos anaeróbios visando a produção de metano.

Levando-se em consideração que o setor sucroalcooleiro representa um dos segmentos do agronegócio brasileiro mais importantes da atualidade, o aproveitamento da energia renovável proveniente dos dejetos da atividade na forma de biogás vem merecendo especial destaque, como uma forma eficaz de mitigar impactos ambientais e sanitários.

Este trabalho utilizou efluente de um processo anaeróbio que empregou vinhoto e glicerol para a produção de hidrogênio, com o objetivo de produzir metano, ou seja, produzir dois combustíveis e otimizar a produção de energia. Portanto, neste trabalho foi avaliado processo anaeróbio em escala laboratorial para verificar a produção de gás metano gerado a partir de efluente de processo de produção de biohidrogênio, utilizando vinhoto e glicerol.

## 2 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a importância do setor industrial para o sistema econômico do Brasil, a necessidade de gerir as indústrias de forma sustentável é vital, mitigando impactos ambientais, contribuindo socialmente com vistas à manutenção e criação de novos postos de trabalho e, por fim, agregando valor econômico em suas diversas atividades. A atividade sucroalcooleira sabidamente é causadora de significativos impactos ambientais, afetando negativamente os solos, poluindo o ar e contaminando recursos hídricos, superficiais e subterrâneos. Levando-se em consideração que, para a produção de etanol, é gerado volume residual de vinhoto na proporção de dez a quinze vezes superior em relação ao etanol produzido (FERRAZ et al. 2000), pode-se afirmar que o tratamento deste efluente é de suma importância para a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro. Atualmente, o vinhoto é utilizado na fertirrigação de solos, porém, existe a possibilidade de empregá-lo em finalidades mais nobres, como matéria prima para geração de biogás e energia. Da mesma forma, na produção do biodiesel ocorre a geração de glicerol, o qual é gerado em proporção aproximada de dez por cento do montante de biodiesel produzido, também merecendo tratamento adequado, assim como o vinhoto.

A fim de atenuar tais impactos ambientais, visando uma gestão adequada da atividade sucroalcooleira e em consonância às prerrogativas legais existentes, a aplicação de biodigestores anaeróbios pode contribuir de forma substancial para o setor. Isto por que, levando-se em consideração a geração em nível nacional de aproximadamente trinta milhões de metros cúbicos de álcool por ano, são necessários cerca de doze milhões de toneladas de oxigênio para a estabilização deste efluente. Em contrapartida, através de processos anaeróbios, poderíamos obter como valor energético, a partir do vinhoto, aproximadamente dezenove milhões de toneladas de metano para fins energéticos.



### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a produção de metano a partir de efluentes de tratamento acidogênico para produção de biohidrogênio, utilizando vinhoto e de misturas vinhoto/glicerol.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho se dividem em:

1. Caracterizar os substratos oriundos de processo de produção de biohidrogênio;
2. Determinar a produção de metano em diferentes concentrações iniciais de DQO;
3. Avaliar a velocidade de produção de biogás a partir do efluente de tratamento acidogênico para produção de biohidrogênio com vinhoto;
4. Avaliar os parâmetros cinéticos da produção de biogás a partir do efluente de tratamento acidogênico para produção de biohidrogênio com misturas vinhoto/glicerol.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

Inicialmente, é necessário esclarecer que a atividade sucroalcooleira representa uma atividade econômica do setor industrial que prescinde de licenciamento ambiental específico para sua adequada operação. Isto por que reconhecidamente se refere a uma atividade impactante sob o ponto de vista ambiental, remetendo a esta respectiva necessidade. Desta forma, dá-se origem aos aspectos abordados nesta revisão, os quais prosseguirão versando sobre questões operacionais de um sistema anaeróbio, desde os fundamentos da digestão anaeróbia até aspectos de partida e operação do sistema e, ao final, fornecendo detalhes sobre o potencial econômico associado ao biogás gerado em sistemas anaeróbios.

### 4.1 LICENCIAMENTO AMBIENTAL

Segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 237, de 1997, licenciamento ambiental é caracterizado como o procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso.

A responsabilidade pelos licenciamentos ambientais, de acordo com o potencial poluidor; extensão e demais tipicidades de cada atividade ou empreendimento, recai sobre os governos federal; estadual e municipais que, através do corpo técnico de suas autarquias, deliberam no sentido de autorizar, mediante critérios técnicos definidos, tais empreendimentos ou atividades.

Os instrumentos de licenciamento ambiental estão baseados em prerrogativas legais e trazem consigo exigências que visam adequar e padronizar as atividades humanas tidas como impactantes, de forma a garantir a conservação racional dos recursos naturais existentes.

A Lei da Política Nacional do Meio Ambiente (6.938/1981) atribui ao CONAMA em seu artigo oitavo a competência de definir normas e critérios para o

licenciamento de atividades efetivas ou potencialmente poluidoras, a ser concedido pelos Estados mediante proposta e supervisão do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA). A Resolução CONAMA 237/1997, que dispõe sobre o licenciamento ambiental, lista em seu Anexo 1 os empreendimentos e atividades sujeitos a este procedimento administrativo. Dentre as atividades citadas, constam as agropecuárias.

No caso da atividade sucroalcooleira, os critérios recomendados são estipulados pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM), a qual se baseia na Resolução CONAMA 237/1997 para definir o roteiro do licenciamento ambiental, constando as seguintes etapas: Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO). Os principais critérios que devem ser observados em empreendimentos sucroalcooleiros, além da sua localização, dizem respeito à gestão de resíduos produzidos, desde a sua origem, coleta e aplicação final ou tratamento.

No Rio Grande do Sul, em consonância com o Código Estadual de Meio Ambiente (Lei 11.520/2000), o licenciamento ambiental do setor sucroalcooleiro pode ser efetuado por órgãos ambientais municipais. A medida que define a atribuição pelo licenciamento é o porte do empreendimento e potencial poluidor.

#### 4.2 PANORAMA DA PRODUÇÃO SUCROALCOOLEIRA

Até a década de 1930 a produção açucareira no Brasil era dominada pelos usineiros nordestinos e esta era direcionada para o abastecimento da própria região e exportada principalmente para o Centro Sul. A concorrência internacional era muito forte, isto é, por um lado havia a concorrência do açúcar de beterraba dos países europeus (fortemente subsidiado internamente) e, por outro, do açúcar da própria cana. Salienta-se que, no período, Cuba apresentava uma produção muito mais eficiente que o Nordeste (ARAGÃO, 1993).

Contudo, segundo Figueiredo (2010), após a década de 1930 o Centro Sul, mais especificamente o Estado de São Paulo, passa a se destacar como produtor de açúcar e, posteriormente, de etanol.

Isso se deve ao fato do forte processo de desenvolvimento econômico, através da industrialização, pelo qual passava o Estado de São Paulo e a região

Sudeste do Brasil. E, com a crise da produção cafeeira no final da década de vinte, muitos ex-cafeicultores viram no açúcar uma saída viável para a superação de suas perdas.

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção de açúcar em todo o mundo dobrou desde o início da década de 70, passando de aproximadamente 71 milhões de toneladas de açúcar bruto, na safra de 1971, para aproximadamente 160 milhões de toneladas na safra 2010/2011. O aumento do consumo de açúcar levou a um crescimento na produção da cana-de-açúcar em todo o mundo. Na safra brasileira de 2016/2017, são projetadas 39.962,8 milhões de toneladas de açúcar, representando acréscimo de 19,3% em relação a safra anterior (CONAB, 2016).

Atualmente, o Brasil é um dos maiores produtores de açúcar e ocupa papel de liderança mundial no setor de biocombustíveis. As regiões tradicionais de plantio da cana são o Triângulo Mineiro, o interior de São Paulo, os estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná e em certas regiões do Nordeste. Mas indústrias relacionadas ao setor estão espalhadas por todo o país, tanto as dedicadas à produção de biocombustível quanto aquelas que produzem equipamentos e outros insumos para a lavoura. Na região Sul do país, existe a projeção de representatividade de 8,5% em relação a safra nacional de 2016/2017 para a produção de açúcar.

O setor sucroalcooleiro constitui o principal agronegócio brasileiro. Na safra 1999/2000, foram produzidas 315 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, 20 milhões de toneladas de açúcar e 12,8 bilhões de litros de álcool, sendo o Estado de São Paulo responsável por 194 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, 13,0 milhões de toneladas de açúcar e 8,5 bilhões de litros de álcool (YAMADA et al., 2002).

A safra de 2004 apresentou produção de 383 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, demonstrando evolução na produtividade que, na época, representou 31% do volume gerado em nível mundial (VIEIRA, 2007).

Na safra 2005/2006, a moagem foi de 431,4 milhões de toneladas de cana, que resultou na produção de 26,7 milhões de toneladas de açúcar e 17 bilhões de litros de álcool (DIEESE, 2007). No contexto global, em 2005 a produção mundial de etanol totalizou 46,0 bilhões de litros e apresentou um crescimento de 12,8% em

relação a 2004, destacando Estados Unidos e Brasil como os maiores produtores, responsáveis por 70% da oferta global (RENEWABLE FUEL ASSOCIATION, 2006).

No ano de 2006, o parque sucroalcooleiro brasileiro possuía 320 indústrias em atividade, sendo 227 na região Centro-Sul e 94 na região Norte-Nordeste, que impulsionavam a atividade econômica de mais de 1.000 municípios brasileiros. Havia, ainda, no país, perto de 30 projetos em fase de implantação (DIEESE, 2007).

Porém, apesar deste crescimento em volume de produção até meados de 2010 e da importância econômica da atividade, o negócio sucroalcooleiro aumentou significativamente seus custos de produção nos últimos cinco anos do período. Aliado a preços muito baixos relativo à queda do preço internacional de açúcar e também um teto comercial que o etanol possui no mercado. Os custos de produção chegaram a superar o preço que a usina recebia pelo etanol produzido.

Como resultados, desde o ano de 2007 ocorreu o fechamento de 58 usinas somente na região Centro-Sul do país, sendo que apenas em 2014 foram 12 usinas a encerrar as atividades. Com isso, nos últimos dois anos, o setor de açúcar e etanol já perdeu 60 mil empregos.

Contudo, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), a safra de cana-de-açúcar moída no ano de 2013 apresentou produtividade de 658,8 milhões de toneladas, levemente superior a registrada em 2014, que foi de 634,8 milhões. Na safra 2014/2015, o Brasil processou um volume de 632,1 milhões de toneladas de cana que resultou na produção de 35,5 milhões de toneladas de açúcar.

Conforme prevê a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), para a safra 2016/2017 são projetadas 684,77 milhões de toneladas de cana, representando acréscimo de 2,9% em relação à safra anterior e um aumento de 58,73% sobre a safra 2005/2006.

Segundo Schouchana & Widonsck (2001), as exportações brasileiras de açúcar destinam-se a 69 países e, dentre eles, a Rússia é o maior importador. Também merecem destaques como importadores de açúcar brasileiro o Egito, a Nigéria, o Irã, os Emirados Árabes, o Canadá, a Índia, a Romênia, os EUA e a Arábia Saudita.

A recuperação da produtividade do setor sucroalcooleiro deve reocupar postos de trabalho através da reabertura e criação de novas usinas para produção de açúcar e etanol. Desta forma, o Brasil posiciona-se no cenário internacional como

o maior produtor e exportador mundial de açúcar de cana e o maior produtor e consumidor de álcool, sendo também o único país a introduzir, em larga escala, o álcool como combustível alternativo ao petróleo.

Segundo Saito (2000), a indústria canavieira convive, no âmbito mundial, com as incertezas relativas às reservas mundiais de açúcar e de combustível, e, no âmbito nacional, com políticas protecionistas e diferenças regionais. No Brasil, o setor pode ser dividido em duas regiões: Norte Nordeste, voltada para a produção de açúcar para exportação e Centro Sul, voltada para a produção de álcool como alternativa energética. Com a liberação de mercado e o crescente aumento da eficácia produtiva, o Centro Sul ultrapassou o Norte Nordeste nas exportações de açúcar, o que vem gerando um cenário de conflito econômico entre as regiões (WAACK et al., 1998).

No Rio Grande do Sul, conforme destaca a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural estadual (EMATER RS, 2016), não existem impedimentos técnicos ao crescimento da produtividade sucroalcooleira neste Estado. Na safra de 2012/13, foi obtido rendimento de uma média de 60 t/ha, sendo que foi alcançada produtividade de até 120 t/ha em localidades assistidas pelo órgão, na região Noroeste, a qual é responsável por ser a principal região produtora do Estado. Análises feitas em variedades de cana-de-açúcar, também confirmam o grande potencial para o seu cultivo no Rio Grande do Sul.

Segundo dados da Cooperativa Mista de Produção, Industrialização e Comercialização de Biocombustíveis do Brasil (COOPERBIO, 2015), cooperativa do setor de bioenergia com atuação no Rio Grande do Sul e com unidade central no município de Frederico Westphalen, a produtividade alcançada na primeira implantação da COOPERBIO no Estado foi de 60 t/ha, consorciado com feijão, no município de Redentora no ano de 2007. Porém, os valores variaram ao longo dos últimos cinco anos, em função de variações das condições climáticas.

Conforme informa relatório da CONAB, relativo ao ano de 2016, a estimativa de produtividade da próxima safra de cana de açúcar para a região Sul do país é de 74,5 t/ha, demonstrando perspectiva de evolução com relação ao valor atingido em 2007. Comparando com a região Sudeste do país, que apresenta previsão de 79,6 t/ha, a região Sul apresenta competitividade no setor em termos de produtividade por área cultivada (CONAB, 2016).

Ainda, segundo dados do DIEESE relativos ao ano de 2006, o agronegócio sucroalcooleiro brasileiro faturou, direta e indiretamente o equivalente a 2,35% do PIB nacional. É, também, um dos setores que mais empregam no país, com mais de 3,6 milhões de empregos diretos e indiretos, reunindo mais de 72.000 agricultores.

#### 4.3 ATIVIDADE SUCROALCOOLEIRA E A GERAÇÃO DE ENERGIA

A cana-de-açúcar é uma planta que pertence ao gênero *Saccharum* L. Há pelo menos seis espécies do gênero, sendo a cana-de-açúcar cultivada um híbrido multiespecífico, recebendo a designação *Saccharum spp.* As espécies de cana-de-açúcar são provenientes do Sudeste Asiático, sendo a planta a principal matéria-prima para a fabricação do açúcar e álcool (etanol).

É uma das culturas agrícolas mais importantes do mundo tropical, gerando centenas de milhares de empregos diretos. É uma importante fonte de renda e desenvolvimento. O interior paulista, principal produtor mundial de cana-de-açúcar, é uma das regiões mais desenvolvidas do Brasil, com elevados índices de desenvolvimento urbano e renda per capita muito acima da média nacional.

Na primeira grande crise mundial do petróleo, ocorrida em 1973, o país importava cerca de 80% de sua necessidade de consumo. Para enfrentar essa crise, o governo federal idealizou três programas: a substituição do diesel, do óleo combustível e da gasolina por outras fontes internas de energia. O Programa Nacional do Álcool (Proálcool) foi criado em 1975, com a função de regulamentar o uso do álcool anidro misturado à gasolina em todo o país, para reduzir a importação de óleo cru e conter, dessa forma, uma crise no balanço de pagamentos (VIEIRA, 2007).

Os resíduos da cana-de-açúcar, tais como bagaço, folhas, pontas e o vinhoto, podem ser usados para cogeração de energia para consumo próprio das usinas, bem como para venda no mercado de energia.

A cogeração em usinas sucroalcooleiras apresentou, nos últimos anos, expansão na matriz energética brasileira, sinalizando um avanço no aproveitamento da energia contida na biomassa vegetal (bioenergia), sendo este aproveitamento bioenergético discutido pela academia científica internacional, para diferentes fontes vegetais (STEINER et al., 2011). O aproveitamento da energia da biomassa

desponta ecológica, financeira e tecnologicamente adequado. A expansão da cogeração ocorre em um período de crescente demanda energética e de grandes números de pesquisas internacionais sobre as energias renováveis produzidas com sustentabilidade (SANTOS et al., 2011).

O contexto da bioeletricidade nos últimos anos e, especificamente em 2013, não divergiu do observado em 2012. Os leilões de energia permanecem apontando o volume de energia proveniente de usinas de biomassa de cana como sendo incipiente, sendo que nestes leilões as usinas eólicas continuam se destacando como mais competitivas no setor de energias renováveis alternativas.

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), considerando todas as linhas de crédito destinadas ao setor sucroalcooleiro, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) liberou R\$ 6,9 bilhões em 2013, 64% acima dos R\$ 4,2 bilhões de 2012, retornando ao patamar verificado em 2010. Os investimentos direcionados para a bioeletricidade caíram 71% de 2012 para 2013, sendo que o maior investimento em cogeração nos últimos seis anos foi obtido em 2008, com o desembolso de R\$ 1,9 bilhão pelo BNDES.

O motivo que conduz o governo federal em incentivar essa produção de energia tem relação com a necessidade de proporcionar incremento de suprimento energético na região Centro Sul do País. De forma complementar, também como forma estratégica de suprir deficiências hídricas provocadas pelo menor regime de chuva entre maio e novembro, que coincide com a época de moagem da cana nessa região. Esta estratégia pode garantir uma oferta energética razoavelmente confiável em médio e longo prazos, tendo em vista que atualmente a oferta energética deste tipo de fonte ainda é incipiente.

Vinhoto pode ser caracterizado como o resíduo final obtido durante a produção de etanol por fermentação de cana-de-açúcar (BARROS et al., 2015). O vinhoto é essencial para a produção de bioenergia, que é a matéria-prima utilizada na produção de biogás. Nas características gerais do presente composto, destacam-se o pH ácido, temperatura elevada na sua geração, alta demanda biológica por oxigênio (DBO) e demanda química por oxigênio (DQO) e teores significativos de nutrientes (MENESES, 2008).

Outra frente de expansão está no aproveitamento do bagaço para fins energéticos e venda no mercado às distribuidoras de energia. Do potencial de produção, estimado em 3.852 MW para São Paulo, o aproveitamento recente ainda



é muito baixo, sendo comercializados apenas 460 MW, ou seja, 11,9% desse potencial. As evidências levantadas demonstram que a principal explicação do baixo aproveitamento estaria na ausência de coordenação entre os co-geradores de energia via bagaço de cana e o governo (IEA, 2005).

Tais características do efluente gerado pela indústria sucroalcooleira permitem que a cana-de-açúcar possua potencial para garantir benefícios econômicos e ambientais através do tratamento deste efluente por meio de reatores anaeróbios.

#### 4.4 PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DA ATIVIDADE SUCROALCOOLEIRA

Dos efluentes líquidos da produção de etanol, a partir da cana de açúcar, o vinhoto é o que possui a maior carga poluidora, pois apresenta um DBO variando de 20.000 a 35.000 mg.L<sup>-1</sup> (GRANATO, 2003).

O vinhoto resultante do processo de produção do álcool é um resíduo de potencial contaminação ambiental, pois cada litro de álcool produzido gera dez a quinze litros de vinhoto (FERRAZ et al., 2000). Caracterizado por ser um líquido de odor forte, coloração marrom-escuro, baixo pH, alto teor de potássio e com alta demanda química de oxigênio (DBO), ou seja, com alta carga de matéria orgânica contida no efluente, torna-se um material altamente poluidor.

A crescente demanda pelo álcool automotivo faz com que as atenções se voltem para o aumento da produção de resíduos, principalmente o vinhoto. Atualmente, existem normas ambientais que restringem o uso do vinhoto no solo. Outra opção é a melhoria no processo de destilação reduzindo assim a produção de vinhoto por litro de álcool (SALOMON, 2007).

A safra de 2012/13 no Brasil produziu aproximadamente 26 bilhões de litros de etanol e 312 bilhões de litros de vinhoto (10-14 L de vinhoto de etanol produzido). Por práticas usuais, o vinhoto é aplicado diretamente sobre o solo devido ao seu teor de matéria orgânica e teores de nutrientes (especialmente de potássio, mas também de nitrogênio e fósforo), o que o torna um bom biofertilizante, independentemente se ele for utilizado em ideais proporções (FERRAZ JÚNIOR et al., 2014).

Porém, o alto potencial poluidor associado ao vinhoto, traz consigo sérios riscos de contaminação do solo e águas, subterrâneas e superficiais. Portanto, o uso

do vinhoto como matéria prima para produção de biogás por meio de reatores anaeróbios, além de reduzir impactos ambientais, vislumbra importante alternativa econômica a partir de um efluente industrial.

Para Giachini & Ferraz (2009), o uso de vinhoto em áreas agrícola, especialmente em lavoura de cana, traz benefícios indiscutíveis tanto do ponto de vista agrônomo quanto do econômico e social.

Silva et al. (2007) alertam que, quando aplicado em altas doses, o vinhoto pode acarretar efeitos indesejáveis como o comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, salinização do solo e poluição do lençol freático.

O tratamento de dejetos por digestão anaeróbia possui várias vantagens, como no emprego do metano como fonte de energia, a produção de menor volume de dejetos a menores custos em decorrência da produção de baixa biomassa e a capacidade de estabilizar grandes volumes de dejetos orgânicos diluídos a baixo custo (SANCHEZ et al.,2005).

#### 4.5. UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A disponibilidade de energia é um dos fatores mais importantes no mundo moderno. A utilização de energia primária está baseada principalmente na disponibilidade de combustíveis fósseis. Desde milhões de anos, a energia solar tem sido recolhida sob a forma de biomassa e durante um longo período transformada em carvão, petróleo e gás natural. Por algum tempo, durante um período de um ou dois séculos, a humanidade está consumindo esses recursos de energia acumulada sem pensar em sua finitude e utilização sustentável. Até agora, vários estudos mostram que os combustíveis fósseis em consumo constante se esgotarão em aproximadamente quarenta anos. Além de que a combustão de uma grande quantidade de carbono proveniente dos combustíveis fósseis leva a um acúmulo de gases de efeito estufa (GEE), podendo ocasionar um aquecimento global com graves conseqüências para o clima mundial (BACKES, 2011).

Uma alternativa adequada é o uso da biomassa como fonte sustentável de energia, especialmente nas agroindústrias brasileiras associadas, nas quais, em 2009, estimou-se a geração de 291.138.869 toneladas de resíduos e 604.255.461

metros cúbicos de efluentes passíveis de reaproveitamento energético (BACKES, 2011).

Em termos energéticos, biomassa é toda matéria orgânica de origem animal e vegetal, que pode ser utilizada para obtenção de energia. Assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis de energia, biomassa vegetal é uma forma indireta de energia solar, sendo convertida em energia química através da fotossíntese, base da maioria dos processos biológicos existentes (VIRMOND, 2007).

Uma vez determinada a produção teórica de metano, poderá ser estimada a produção total de biogás a partir do teor esperado de metano neste. Os teores de metano no biogás são geralmente da ordem de 65 a 70% (JORDÃO & PESSOA, 1995). Contudo, estudos conduzidos por Lobato (2011) apontaram teores de até 90% de metano em biogás gerado a partir de processos anaeróbios com matéria orgânica presente em esgoto doméstico.

O biogás é constituído principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), e é emitido quando substâncias orgânicas são degradadas. Nestes casos, normalmente, os gases seriam liberados para a atmosfera se dispostos a céu aberto, ou no momento da dispersão em um campo aberto, que é uma prática agrícola comum. O biogás é considerado uma forma limpa e renovável de energia, porque o carbono é proveniente de fontes vegetais e animais, ao invés de fontes geológicas. O metano é capturado e usado como fonte energética, e não simplesmente emitido para a atmosfera, o que é importante, pois é um gás de efeito estufa muito mais potente que o dióxido de carbono (BACKES, 2011).

Estudo desenvolvido por Sawasdee & Pisutpaisal (2014), analisou o potencial de produção de metano a partir de capim elefante, com diferentes concentrações de sólidos totais (5%, 10% e 15%). A maior produção de metano foi verificada em níveis de concentração de sólidos na faixa de 5%.

Xia et al. (2011), em experimento anaeróbio utilizando resíduos de suinocultura e lodo de matadouro para produção de biogás, com e sem aditivos de penas de galinhas, obtiveram volumes de metano na faixa de 350 litros em um tempo de detenção hidráulica de 150 dias. O experimento, que utilizou variações na composição de efluentes, detectou este significativo volume de metano no composto de efluentes representado por dejetos de suínos com penas de galinhas.

Os benefícios do reaproveitamento energético de resíduos por processos anaeróbios são inúmeros, tanto em nível social quanto ambiental e econômico. A mudança do sistema de gestão dos resíduos leva a redução do volume anual a ser disposto de forma inadequada, reduzindo igualmente impactos ambientais associados e trazendo outros benefícios indiretos, como a geração de emprego e renda. Além disto, reduz-se conseqüentemente a carga de efluentes gerados no campo, evitando a contaminação dos cursos d'água. A utilização dos resíduos para a geração de energia oferece como vantagem, ainda, a obtenção de energia renovável, reduzindo a dependência de energia fóssil (BACKES, 2011).

A Tabela 1 demonstra a equivalência energética do biogás, quando comparado a demais fontes de energia:

Tabela 1: Equivalência energética do biogás comparado a outras fontes de energia

ENERGÉTICO	FERRAZ & MARIEL (1980)	SGANZERLA (1983)	NOGUEIRA (1986)	SANTOS (2000)
Gasolina (L)	0,61	0,613	0,61	0,6
Querosene (L)	0,58	0,579	0,62	-
Diesel (L)	0,55	0,553	0,55	0,6
GLP (kg)	0,45	0,454	1,43	-
Álcool (L)	-	0,79	0,80	-
Carvão M. (kg)	-	0,735	0,74	-
Lenha (kg)	-	1,538	3,5	1,6
Eletricidade (kWh)	1,43	1,428	-	6,5

Fonte: Coldebella et al., 2008.

Observa-se que os resultados verificados entre os autores, com exceção para a eletricidade, estão relativamente próximos, aumentando a confiabilidade dos dados. No caso da eletricidade, é provável que outra metodologia tenha sido utilizada pelos autores anteriores ao estudo de Santos (2000).

#### 4.6 FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Uma das aplicações da digestão anaeróbia representa o processo biológico de transformação de matéria orgânica em biogás, em condições anaeróbias, ou

seja, na ausência de oxigênio através da atividade de microrganismos, as arqueas. A digestão anaeróbia pode, através da reutilização de resíduos de um produto ou processo produzir combustível renovável e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, bem como fornecer fertilizantes de alta qualidade no final do processo (BACKES, 2011).

Quando o lodo de excesso é mantido em um ambiente anaeróbio, então desenvolver-se-ão populações de arqueas anaeróbias, que usam o lodo de excesso como fonte de carbono orgânico para processos metabólicos fermentativos, tendo como produtos gasosos finais metano e dióxido de carbono, principalmente.

Os digestores anaeróbios têm sido largamente aplicados para o tratamento de resíduos sólidos, incluindo culturas agrícolas, dejetos de animais, lodos de ETEs e lixo urbano, estimando-se que milhões de digestores anaeróbios tenham sido construídos em todo o mundo com esse propósito.

#### **4.6.1 Fases da digestão anaeróbia**

O processo de digestão anaeróbia pode ser dividido em quatro fases principais, iniciando pela hidrólise; acidogênese; acetogênese e metanogênese.

No digestor anaeróbio os quatro processos se desenvolvem simultaneamente. Quando o digestor funciona adequadamente, a conversão dos produtos intermediários (isto é, dos primeiros três passos da digestão anaeróbia) é quase completa, de modo que a concentração desses se mantém baixa (HAANDEL & MORAIS, 1999).

Conforme descreve Lettinga et al. (1996), uma vez que as arqueas não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, a primeira fase no processo de degradação anaeróbia consiste na hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros), em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores), os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Esta conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos é conseguida através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Na anaerobiose, a hidrólise dos polímeros usualmente ocorre de forma lenta, sendo vários os fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado: temperatura operacional do reator; tempo de resistência do substrato no reator; composição do

substrato (ex.: teores de lignina, carboidrato, proteína e gordura); tamanho das partículas; pH do meio; concentração de produtos da hidrólise (ex.: ácidos graxos voláteis).

Segundo Van Haandel & Lettinga (1994), a acidogênese é efetuada por um grande e diverso grupo de bactérias fermentativas, a exemplo das espécies *Clostridium* e *Bacteroids*. As primeiras constituem uma espécie anaeróbia que forma esporos, podendo, dessa forma, sobreviver em ambientes totalmente adversos. As *Bacteroids* encontram-se comumente presentes nos tratos digestivos, participando da degradação de açúcares e aminoácidos. Segundo estes mesmos autores, a maioria das bactérias acidogênicas é anaeróbia estrita, mas cerca de 1% consiste de bactérias facultativas que podem oxidar o substrato orgânico por via oxidativa. Isso é particularmente importante, uma vez que as bactérias anaeróbias estritas são protegidas contra a exposição ao oxigênio eventualmente presente no meio.

As arqueas metanogênicas acetoclásticas são normalmente os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia, embora poucas espécies de arqueas metanogênicas sejam capazes de formar metano a partir do acetato. Estas arqueas são responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano, a partir do grupo metil do ácido acético. Pertencem a dois gêneros principais: *Methanosarcina* e *Methanosaeta* (*Methanothrix*). O gênero *Methanosaeta* caracteriza-se por utilizar exclusivamente o acetato, tendo, por este, mais afinidade que as metanosarcinas. Desenvolvem-se na forma de filamentos e tem grande importância na formação da trama bacteriana presente nos grânulos. Os organismos pertencentes ao gênero *Methanosarcina* se desenvolvem na forma de cocos, que se agrupam formando “pacotes”. São considerados os mais versáteis entre os metanogênicos, já que possuem espécies capazes de utilizar também o hidrogênio e as metilaminas (SOUBES, 1994).

As principais fases da digestão anaeróbia para a produção de biogás estão representadas na Figura 1.

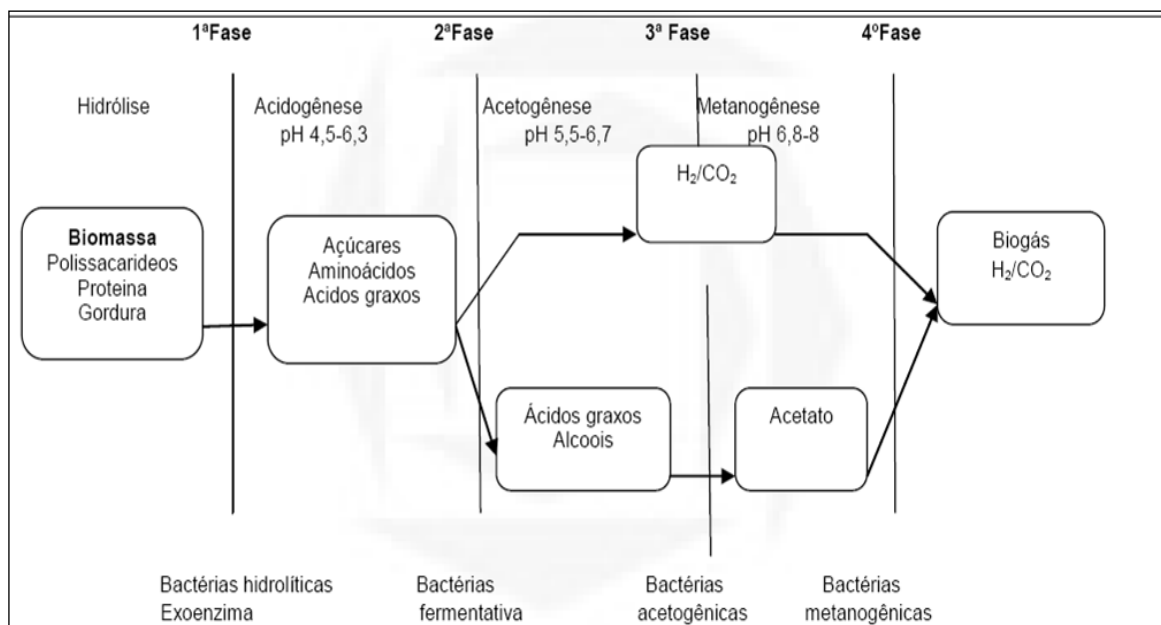


Figura 1: Fases da digestão anaeróbia na produção de biogás.  
Fonte: Weiland, 2003.

A digestão anaeróbia corresponde a um sistema complexo, com interações simultâneas entre diferentes microrganismos, cada um cumprindo com suas funções no processo de hidrólise, acidogênese, acetogênese, até atingir a conversão do ácido acético ao gás metano.

#### 4.6.2 Temperatura

A temperatura constitui-se em um dos fatores de extrema importância em processos anaeróbios, pois, assim como outros fatores, cria condições favoráveis ou adversas para o metabolismo das arqueas responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano.

As arqueas produtoras de biogás, em especial as que produzem metano, são muito sensíveis a alterações de temperatura. A faixa ideal para a produção de biogás é de 35 a 45°C (arqueas mesofílicas). O mais importante é que não deve haver variações bruscas de temperatura, pois as arqueas não sobrevivem e, portanto, a produção do biogás diminui consideravelmente (PROSAB, 2001).

Experimento desenvolvido por Cremones et al. (2014), avaliou a co-digestão anaeróbia do vinhoto, oriundo dos processos de produção do etanol hidratado, e dos resíduos de suinocultura. Dentre os fatores avaliados, foi realizado um comparativo entre dois reatores, um deles operando com temperatura controlada e outro com

temperatura ambiente. As eficiências de remoção de sólidos totais voláteis (STV) foram de 29,9% para o reator termicamente controlado contra 25,4% do reator a temperatura ambiente, para eficiência de remoção de DQO verificaram-se valores médios de 69,0% no reator controlado e 68,4% no reator a temperatura ambiente. O controle da temperatura proporcionou produção acumulada de metano ao reator 1330% superior ao reator mantido em condição ambiental.

De acordo com estudos realizados por diversos autores, o melhor desempenho geral observado em biodigestores anaeróbios ocorre em temperaturas na faixa de 35 e 40°C. Isso, provavelmente, deve-se ao fato de que essa faixa de temperatura no substrato favorece maior atividade das arqueas metanogênicas. Tal evidência está de acordo com o que menciona PROSAB (2001).

Segundo Amorim et al. (2004), através de experimento que avaliou a produção de biogás por dejetos de caprinos em diferentes estações do ano, existe diminuição no tempo para a obtenção de teores elevados de metano nas épocas do verão e da primavera, em comparação ao inverno e outono, conforme é demonstrado na Figura 2.

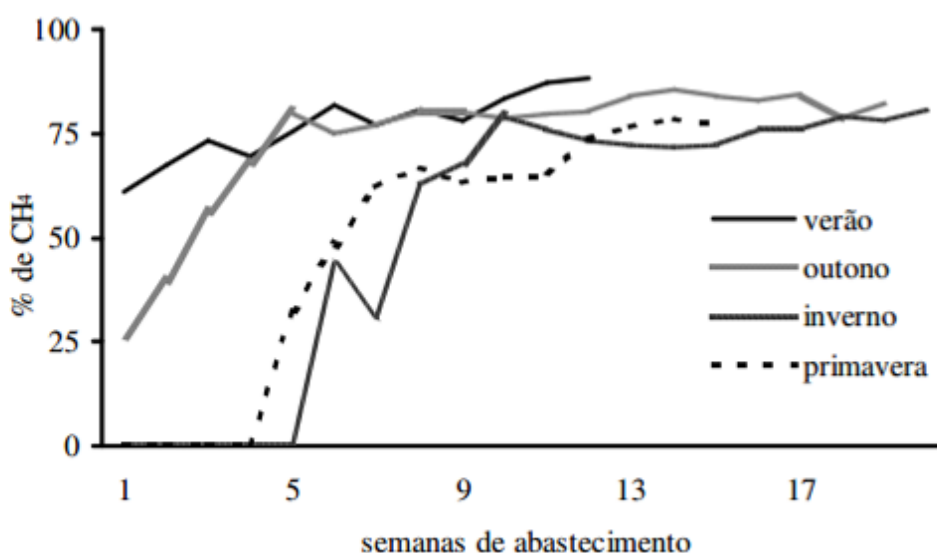


Figura 2: Teores de metano contidos no biogás produzido durante as estações de verão, outono, inverno e primavera, em biodigestores abastecidos com substratos de dejetos de caprinos.

Fonte: Amorim et al., 2004.

Ainda, segundo os autores, temperaturas mais altas sobre a massa no interior dos biodigestores, provavelmente aumentaram a população de arqueas metanogênicas no meio, além de incrementar a sua atividade.



### 4.6.3 Alcalinidade e pH

Outro fator importante em processos anaeróbios é a alcalinidade e pH do meio. A alcalinidade é uma medida da quantidade de carbonato na solução (proveniente do CO<sub>2</sub> produzido durante a digestão anaeróbia). A alcalinidade é importante, pois, conforme as arqueas produzem ácidos, o que implica diminuição do pH, o carbonato reage com esses ácidos, o que leva ao controle da acidez do meio (efeito tampão do carbonato). As arqueas que produzem o metano sobrevivem em faixa estreita de pH (6,5 a 8,0) (PROSAB, 2001).

Particularmente, o pH é um parâmetro chave em processos biológicos, uma vez que afeta atividades enzimáticas, transportadores, e o metabólito da comunidade (TELI et al., 2014).

Experimento desenvolvido com biodigestão anaeróbia de dejetos suínos, com adição de 16 gramas de óleo a cada quilo de substrato, apresentou pH próximo de 6,5. Os autores relatam que este é o valor mínimo dentro da faixa ótima para produção de biogás, que varia de um pH de 6,5 a 7,5. Os valores inferiores de pH reduzem a produção de biogás, pois são desfavoráveis à sobrevivência microbiana (RODRIGUES et al., 2014).

Aquino & Chernicharo (2005), em estudo que avaliou causas e estratégias de controle em reatores anaeróbios sob estresse, apontam que a inibição dos microrganismos sintróficos pela acumulação de produtos acidogênicos levará a uma contínua acumulação de ácidos graxos voláteis, o que contribuirá para o consumo de alcalinidade e decréscimo do pH. Essa redução do pH afetará principalmente o crescimento de microrganismos metanogênicos e sintróficos, compondo o problema de acumulação de ácidos graxos voláteis e podendo levar à falha do processo.

Apesar de o vinhoto apresentar pH ácido, após sua introdução no reator, devido ao consumo dos ácidos orgânicos e formação de compostos como amônia, ocorre rápida elevação do pH do meio reacional sem necessidade de adição de compostos alcalinos (GRANATO, 2003).

### 4.6.4 Ácidos voláteis

A concentração de ácidos voláteis totais (AVT) é um parâmetro de extrema importância para a digestão anaeróbia. Os ácidos graxos voláteis devem estar em equilíbrio com a alcalinidade do sistema. A inibição do processo anaeróbio por

ácidos graxos voláteis está associada ao pH. Baixos valores de pH estão geralmente relacionados a altas concentrações de ácidos graxos voláteis e, conseqüentemente, à falência do processo (KUS & WIESMANN, 1995).

Na digestão anaeróbia, a maioria dos microrganismos acidogênicos fermentam açúcares, aminoácidos e ácidos graxos resultantes da hidrólise da matéria orgânica complexa, e produzem conseqüentemente ácidos orgânicos, principalmente ácido acético, propiônico e butírico, além de álcoois (etanol), cetonas (acetona), dióxido de carbono e hidrogênio (AQUINO & CHERNICHARO, 2005).

Em estudo desenvolvido por Santana & Oliveira (2005) sobre tratamento de águas residuárias da suinocultura por meio de reatores anaeróbios, foi verificado que a concentração de ácidos voláteis totais no afluente do reator 1 variou de 825 a 1.648 mg.L<sup>-1</sup> e, no efluente, houve decréscimo para valores médios na faixa de 167 a 169 mg.L<sup>-1</sup>. No efluente do reator 2, diminuiu para valores médios em torno de 142 mg.L<sup>-1</sup>, mesmo com a diminuição do tempo de detenção hidráulica e aumento da carga orgânica volumétrica. Esse comportamento dos ácidos voláteis totais e da alcalinidade total indicou estabilidade dos reatores com geração de alcalinidade, melhorando a capacidade de tamponamento do reator e não permitindo o acúmulo de ácidos voláteis.

Ainda, segundo os autores, os valores de ácidos voláteis totais nos reatores 1 e 2 mantiveram-se abaixo do valor recomendado de 200 mg.L<sup>-1</sup>, o que indicou condições de estabilidade do processo, confirmando as condições favoráveis para a atividade microbiana do lodo e propiciando os bons resultados de desempenho do conjunto reator 1 e reator 2 para a remoção de DQO, sólidos suspensos e produção de metano.

Ferguson et al. (2016), investigaram o efeito de alterações na taxa de carga orgânica e de matéria prima na produção de ácidos graxos voláteis e seu uso potencial como uma ferramenta de gestão de bioengenharia para melhorar a estabilidade de digestores anaeróbios. Os resultados sinalizaram que, uma vez reconhecido o padrão de produção de ácidos voláteis (paralelo ou sequencial), a produção em excesso poderia ser mitigada e o processo otimizado pela bioaugmentação ou manipulação da taxa de carga orgânica.

#### 4.6.5 Sulfato

As descargas indiscriminadas diretas ou indiretas de águas residuárias contendo sulfato, em corpos receptores, podem prejudicar a qualidade das águas e também interferir no ciclo natural do enxofre. Nas zonas anaeróbias, o enxofre oxidado ( $S^{+6}$ ), presente como íon sulfato, é reduzido a sulfeto ( $S^{-2}$ ), o qual está em equilíbrio, conforme o pH em  $S^{-2}$ ,  $HS^{-}$  e  $H_2S$ , aumentando a demanda química de oxigênio. Dessa forma, o lançamento indiscriminado de sulfato num corpo de água compromete o processo natural de autodepuração (SARTI et al., 2008).

O sulfato, apesar de sua presença diminuir a geração de metano devido disputa pelo substrato entre as arqueas redutoras de enxofre e as arqueas metanogênicas, também pode ser explorado em outras aplicações. Segundo Cattony et al. (2007), em experimento desenvolvido para remoção de etanol e benzeno em reator anaeróbio horizontal de leito fixo na presença de sulfato, o reator, bem como as condições adotadas neste experimento foram favoráveis em promover o crescimento microbiano e reduzir sulfato, sob a influência de diferentes concentrações de etanol e benzeno.

Sarti & Zaiat (2011) utilizaram reator anaeróbio em escala de laboratório (quatorze litros) para redução biológica de sulfato, contendo carvão mineral para fixação da biomassa, sendo alimentado com águas residuais industriais com diferentes concentrações de sulfato, a fim de estabelecer seus limites de aplicação. O produto butanol foi utilizado como o principal aditivo orgânico para apoiar o processo biológico. O reator foi operado durante sessenta e cinco ciclos (48 horas cada) com taxas de carga de sulfato variando de 2,2 a 23,8 gramas por ciclo, o que corresponde a concentrações de sulfato de 0,25, 0,5, 1,0, 2,0 e 3,0 gramas de sulfato por litro. A eficiência de remoção de sulfato atingiu 99% nas concentrações de sulfato entre 0,25 a 1,0 grama por litro. Em concentrações mais elevadas de sulfato (2 e 3,0 gramas), a redução se manteve na faixa de 71 a 95%. Os resultados demonstraram o potencial de aplicabilidade do butanol para o tratamento biológico de sulfato em um reator descontínuo anaeróbio.

#### 4.6.6 Redução de enxofre por bactérias

Elementos nutrientes essenciais, como o ferro, e os micronutrientes, como o níquel e o cobalto, demonstram efeitos positivos na produtividade de metano. Já o enxofre em grande quantidade aumenta a produção de  $H_2S$ . Certos íons orgânicos, como o  $K^+$ , o  $Na^+$ , o  $Ca^{++}$ , a amônia iônica  $NH_4^+$ , o  $Mg^{++}$  e o  $S^{-2}$  apresentam, na fermentação, uma propriedade singular: quando em quantidades diminutas são excitantes do metabolismo celular, manifestando, porém, propriedades inibidoras do mesmo metabolismo quando em concentrações mais elevadas (GRANATO, 2003).

Os principais inibidores em potencial encontrados no vinhoto são os íons dos compostos de enxofre e o potássio solúvel, e apresentam concentrações mais críticas no vinhoto oriundo de mosto de melaço e misto de caldo e melaço (GRANATO, 2003).

Ressalta-se que o sulfato como tal não é um inibidor de processo, mas este composto, ao ser utilizado pelas arqueas redutoras do enxofre, também presentes no reator anaeróbio, é transformado em sulfeto, o qual em sua forma solúvel é um agente inibidor em concentrações da ordem de  $200 \text{ mg.L}^{-1}$ . A inibição será então função do equilíbrio resultante no sistema entre as formas solúvel, insolúvel e gasosa do sulfeto (PINTO, 1999).

Beller et al. (2016) analisaram o comportamento de bactérias quimiolitotróficas desnitrificantes do gênero *Thiobacillus* na oxidação de compostos de enxofre reduzido, em processo de tratamento de águas residuais municipais. Através da engenharia metabólica da bactéria *Thiobacillus*, foi relatada a produção de 52 vezes mais ácidos graxos do que pela estirpe de tipo selvagem quando cultivada com tiosulfato e gás carbônico. Este estudo teve como objetivo analisar a possibilidade de tecnologia capaz de produzir combustíveis renováveis e produtos químicos de forma simultânea, através da produção de ácidos graxos em maior quantidade em relação a processos convencionais de tratamento de efluentes líquidos.

#### 4.7 BIOMASSA NOS SISTEMAS ANAERÓBIOS

A digestão anaeróbia é realizada por diferentes microrganismos (bactérias hidrolíticas, fermentativas, acetogênicas e metanogênicas) e envolve um processo

complexo, que naturalmente gera uma série de produtos. Estes produtos se acumulam apenas temporariamente por causa da relação sinérgica que estes organismos fermentativos têm uns com os outros numa relação em cadeia; onde os produtos de um grupo de organismos servem de substrato para o próximo grupo de organismos em um digestor anaeróbio, levando a produção de metano (GOTTSCHALK, 1986).

Para a produção eficiente de metano a partir do vinhoto, estratégias precisam ser desenvolvidas para a inicialização e manutenção da microbiota anaeróbia. Concentrações elevadas de compostos fenólicos, tais como a melanoidina, presente no vinhoto, metais pesados e antibacterianos utilizados no tratamento de levedura, podem diminuir e até mesmo inibir a atividade microbiana (PARNAUDEAU et al., 2008).

Liu et al. (2016) analisaram processo de digestão anaeróbia com alto teor de sólidos, através de metodologia promissora que demanda reator com menor dimensão, menores temperaturas e menor consumo de energia. Os resultados apresentaram relativamente menor eficiência, porém, por vezes, maior tolerância a alguns agentes inibidores do processo. Para investigar os fenômenos microbiológicos, foram analisadas comunidades de arqueas e outras comunidades bacterianas em quatro digestores anaeróbios, para tratamento de lodo de depuração com sólidos totais (ST) de 10 a 19%. Embora as arqueas metanogênicas acetoclásticas ainda fossem as principais vias produzindo metano, a proporção total destes microrganismos diminuiu com o aumento dos ST. Do contrário, a abundância relativa de arquea bactérias metanogênicas hidrogenotróficas aumentou de 6,8% em ST para 10 a 22,3%, em uma concentração de ST de 19%.

Goux et al. (2016), em estudo investigando a forma como a estrutura da comunidade microbiana se estabelece durante a partida de reator anaeróbio alimentado por dejetos bovinos, verificaram que a diversidade e riqueza microbiana diminuiriam, quando o processo de digestão anaeróbia alcançou a estabilidade operacional, indicando o estabelecimento de algumas populações microbianas dominantes, melhores adaptadas para a produção de biogás em condições mesofílicas.

#### 4.8 DIGESTÃO ANAERÓBIA EM REATORES APLICADOS À ATIVIDADE SUCROALCOOLEIRA E DO BIODIESEL

A biodigestão anaeróbia tem como objetivo reduzir o potencial poluidor do vinhoto e ao mesmo tempo produzir um gás e um fertilizante como resíduo. A partir desta premissa, se estuda as possibilidades de utilização do biogás proveniente da biodigestão anaeróbia do vinhoto no Brasil visando a geração de eletricidade (SALOMON, 2007).

O estudo do potencial de produção de biogás a partir da remoção da carga orgânica do vinhoto possibilitará o aproveitamento energético a partir de uma fonte renovável. Este biogás pode ser canalizado e queimado em motores de geração de energia, com o intuito de minimizar os impactos ambientais e valorizar o biogás, que representa uma fonte de energia limpa e renovável.

Uma das formas de transformar metano em eletricidade se dá por motores de combustão interna, sendo possível também por turbinas a vapor, onde a água é aquecida pela queima do gás, impulsionando a turbina para a geração de energia.

Outra forma de transformação do metano em eletricidade ocorre através da incineração do efluente em caldeiras, as quais geram vapor para acionar as turbinas transformando energia cinética em energia elétrica.

Sob o ponto de vista ambiental, a utilização da digestão anaeróbia para tratamento de dejetos do setor sucroalcooleiro é extremamente favorável, uma vez que promove a degradação da matéria orgânica, reduzindo significativamente o potencial poluidor do efluente. Na ótica econômica, a digestão anaeróbia na atividade igualmente se mostra atrativa, possibilitando a geração de biogás como fonte de energia e ainda produzindo biofertilizantes.

O teor de matéria orgânica nos resíduos solúveis pode ser reduzido pela atividade bacteriana. A atividade bacteriana anaeróbia promove a redução do teor de matéria orgânica, transformando-a em compostos cada vez menos complexos até a produção de metano. Diz-se que o resíduo é então estabilizado. Digestores anaeróbios representam processos catabólicos (destrutivos) que ocorrem na ausência de oxigênio molecular livre. As metas de digestores anaeróbios são destruir biologicamente uma parte significativa dos sólidos voláteis no resíduo e minimizar a putrefação destes (GERARDI, 2003).

Do processo de digestão anaeróbia o metano e dióxido de carbono emergem como principais produtos. O biogás contém, dependendo do tipo de substratos, em torno de 50-75% em volume de metano e 25-45% de dióxido de carbono. Além disso, são formados subprodutos como hidrogênio, amônia, ácido sulfídrico e outros vestígios de gases (KALTSCHMITT & HARTMANN, 2001).

A taxa de eficiência da digestão anaeróbia é controlada pelo tipo de resíduo a ser digerido, concentração, temperatura, presença de materiais tóxicos, o pH e a alcalinidade, o tempo de detenção hidráulica (TDH), o tempo de detenção de sólidos (TDS), a proporção de alimento para os microrganismos, a taxa de carregamento e a taxa de digestão de substâncias tóxicas dos produtos finais da digestão (BURKE, 2001).

Barros et al. (2015) utilizaram resíduos de suinocultura para arranque de reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), em experimento com processo de digestão anaeróbia com posterior alimentação dos reatores utilizando-se vinhoto natural, proveniente de plantio de cana em Ribeirão Preto, São Paulo. O volume de lodo de resíduos da suinocultura atingiu 30% do volume de cada reator, com o restante sendo preenchido pelo vinhoto natural. A média da eficiência de remoção de DQO foi de aproximadamente 70 a 80%, tendo atingido até 82% de eficiência máxima pelos reatores UASB. Este estudo, que também analisou a conversão anaeróbia do vinhoto em biometano com aumento gradual da carga orgânica em dois reatores UASB, com volumes de 40,5 e 21,5 litros e com operação em temperatura mesófila, verificou produções máximas de metano na ordem de  $0,19 \text{ L (g DQO total removido)}^{-1}$ , alcançadas após 140 dias de operação dos reatores.

Derivados do biodiesel, como o glicerol, e cascas de banana, são resíduos agrícolas dos mais presentes nos países do Sudeste Asiático. Experimento conduzido por Housagul et al. (2014), avaliou o potencial de produção de biometano a partir da co-digestão destes resíduos agrícolas em fermentação anaeróbia mesofílica, com reatores em duplicatas contendo casca de banana pura e casca de banana com glicerol. Todos os tratamentos foram instalados em reatores de 0,5 litros, com coletas de gás e amostras líquidas a cada 12 e 24 horas, respectivamente. A adição de solução tampão na co-digestão de casca de banana pura e casca de banana com glicerol melhorou os teores de produção de metano, sendo que em ambas as composições de efluentes a produção se mostrou similar, em relação a taxas e rendimentos. A co-digestão dos efluentes com a solução

tampão apresentou teores máximos de produção de metano de 181 ml, atestando a capacidade de produção de metano a partir da fermentação de compostos de casca de banana com glicerol.

Panpong et al. (2014), através de experimento com processo de co-digestão anaeróbia, investigaram a possibilidade da produção de biogás a partir de efluentes da produção de enlatados de frutos de mar com dosagens de glicerol, com diferentes graduações. A proporção ótima para a produção de metano verificada neste experimento foi de 1% de glicerol, pela qual foi verificado aumento de 108% do volume de metano, em comparação ao efluente de enlatados de frutos do mar puro. Com um tempo de detenção hidráulica de 64 dias, foram verificados níveis de produção de metano de cerca de 5.000 ml.

Devido ao valor de DQO do glicerol variar de 800 g O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> a 1.000 g O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>, o aumento significativo da produção de metano através do acréscimo de 1% de glicerol junto ao composto de efluentes demonstra o potencial existente para produção de biogás com utilização de glicerol.

#### 4.9 POTENCIAL ECONOMICO DO BIOGÁS GERADO POR BIODIGESTORES ANAERÓBIOS

Além da oportunidade de reduzir os danos ambientais, o biogás pode ser utilizado como combustível na geração de energia elétrica, agregando desta maneira, ganho ambiental e redução de custos, devido a diminuição de compra da energia consumida da concessionária local (PECORA et al., 2009).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil contava em 2009 com apenas 9 usinas de biogás instaladas, o que equivale a 48.522 kW, representando 0,04% da matriz de energia elétrica do país (ANEEL, 2009).

Considerando a concentração elevada da população brasileira e a expressiva produção agropecuária e agroindustrial, é possível supor que o atual aproveitamento do biogás no Brasil encontra-se bastante aquém do seu potencial (ZANETTE, 2009).

Os resíduos agropecuários no Brasil resultariam em um potencial de produção de metano 66,3 milhões de m<sup>3</sup>/dia e os efluentes industriais em potencial de 12,7 milhões de m<sup>3</sup>/dia (ZANETTE, 2009).



Atualmente, a concentração de criatórios de animais, torna atrativa a geração do biogás no próprio local para substituir insumos de energia, economizar dinheiro e aumentar a eficiência energética nas áreas agrícolas (BACKES, 2011).

Uma das possibilidades de agregar valor de forma alternativa na atividade sucroalcooleira através do uso de reator UASB se dá através da venda de créditos de carbono ou Redução Certificada de Emissões (RCE), que se traduz em um certificado emitido para uma pessoa ou empresa que reduziu a sua emissão de gases do efeito estufa. Além do dióxido de carbono, outros gases causadores do efeito estufa também podem ser negociados, utilizando-se o conceito de Carbono Equivalente. Estes créditos podem ser negociados em mercado internacional, sendo que, por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono equivale a um crédito de carbono.

De acordo com Angonese et al. (2007), procedendo-se a uma análise a partir de um valor mais conservador, uma granja com extensões próximas da média brasileira, obteve um acréscimo de receita anual de R\$ 3.186,00 (três mil, cento e oitenta e seis reais), sendo, em valores financeiros, R\$ 5,31 ano<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>.

Desta forma, considerando-se que o Brasil é uma das nações com maior representatividade mundial na atividade sucroalcooleira e, tendo em vista as possibilidades econômicas que podem surgir através do uso de biodigestores nas indústrias, pode-se afirmar que a venda de créditos de carbono no mercado internacional representa alternativa de grande potencial para os produtores, reduzindo ainda impactos ambientais oriundos da poluição atmosférica.

A equação abaixo demonstra o cálculo a ser utilizado para determinação da potência útil e energia elétrica disponível a ser gerada (PECORA et al., 2009):

$$P_x = \frac{Q_x \times P_{c_{\text{metano}}} \times \eta}{860.000}$$

Eq. 1

Onde:

- P<sub>x</sub> - potência disponível a cada ano (kW)
- Q<sub>x</sub> - vazão de metano a cada ano (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.ano<sup>-1</sup>)
- P<sub>c</sub> - poder calorífico do metano = 8.500 kcal.m<sup>-3</sup> CH<sub>4</sub>
- η - eficiência do motor = 0,28

$$E_{disp} = \frac{P_x}{365 \times 24}$$

Eq. 2

Onde:

$E_{disp}$  - energia disponível (kW)

$P_x$  - potência disponível (kW)

365 - dias.ano<sup>-1</sup>

24 - h.d<sup>-1</sup>

## 5 METODOLOGIA

O experimento foi realizado no Laboratório de Tecnologias Ambientais da Universidade de Caxias do Sul (LATAM), no município de mesmo nome.

O substrato utilizado para os estudos de produção de biogás foi o vinhoto tratado anaerobiamente para obtenção de hidrogênio, objeto de outra dissertação de mestrado. No processo de geração de hidrogênio, a fase preponderante é a acidogênese, ou seja, houve também, além da produção de hidrogênio, uma elevada produção de ácidos.

Após o processo de obtenção de hidrogênio, a fração líquida residual foi filtrada para retenção da biomassa produtora de hidrogênio e então submetida ao tratamento com biomassa anaeróbia, em reatores de mistura completa operando em batelada, para obtenção de metano.

### 5.1 UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental foi constituída de 3 reatores, conforme apresentado nas Figuras 3 e 4. O volume útil é de 2,5 L e os reatores foram confeccionados em acrílico.

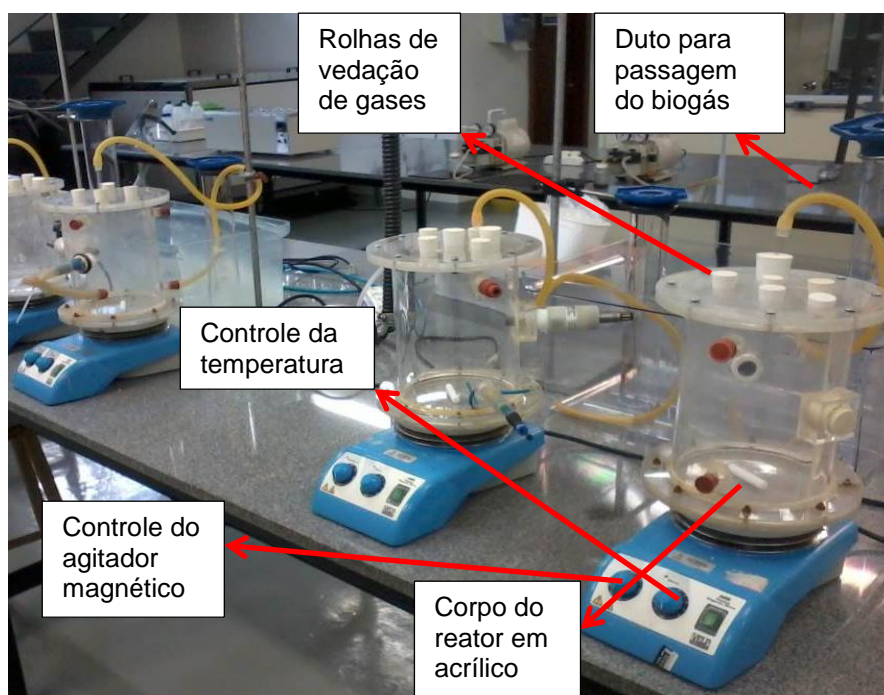


Figura 3: Três reatores instalados para os ensaios laboratoriais.  
Fonte: Autor, 2016.

Para garantir a completa mistura dentro do reator, foram utilizados agitadores magnéticos com placa de aquecimento, garantindo aos reatores a temperatura de  $37 \pm 2$  °C. O reator foi vedado em todas as suas extremidades com silicone, evitando perda de gás. O biogás produzido foi medido por deslocamento de líquido, em uma proveta invertida externa ao reator. O líquido utilizado no sistema foi água com pH 12, para proporcionar a solubilização do gás carbônico e permitir somente o deslocamento do líquido pelo gás metano. A Figura 4 detalha a posição da proveta invertida e do recipiente contendo água com pH 12.

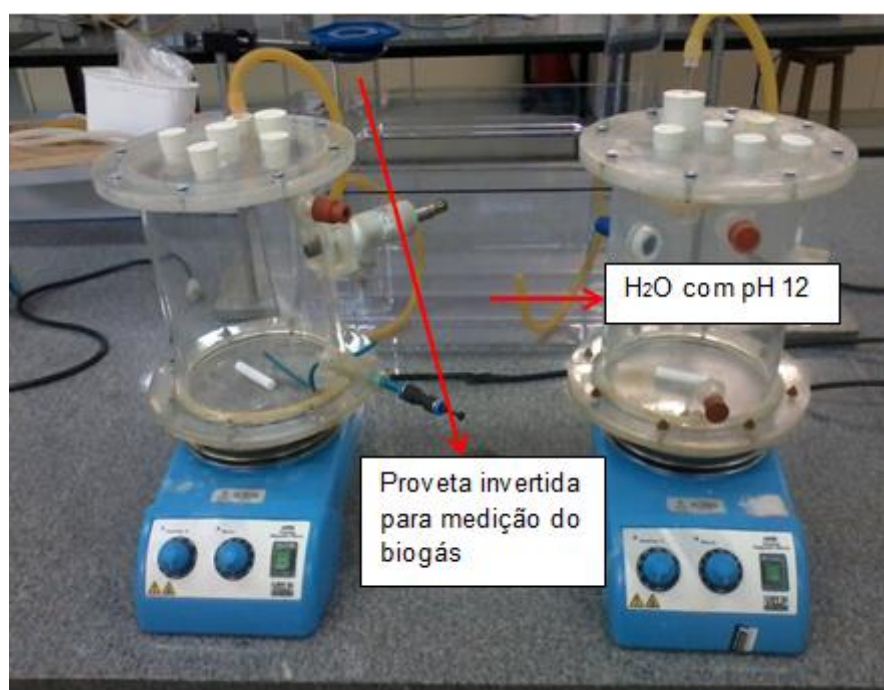


Figura 4: Detalhe da proveta invertida e do recipiente com água pH 12.  
Fonte: Autor, 2016.

## 5.2 AVALIAÇÃO DE PRODUÇÃO DE METANO

As condições operacionais testadas foram baseadas pela caracterização do substrato em cada um dos doze experimentos avaliados, com composições integrais de vinhoto residual pós-processo acidogênico, ou contendo frações de glicerol. Para tanto, foram avaliadas relações de  $A/M$  ( $\text{kgDQO} \cdot \text{kgSVT}^{-1}$ ) igual a 0,5, 1,0 e 1,5 e medido o DQO de cada substrato utilizado, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Composição do substrato dos experimentos e DQO inicial.

Experimento	Composição do substrato (V/G)	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
V1	100	11.140
V2	100	16.847
V3	100	16.167
V4	100	21.440
VG1	80/20	17.142
VG2	60/40	18.522
VG3	60/40	16.764
VG4	80/20	15.888
VG5	80/20	16.380
VG6	20/80	16.052
VG7	60/40	21.035
VG8	80/20	11.633

Fonte: Autor, 2016.

A avaliação da produção de metano foi realizada por leituras ao longo do tempo do volume deslocado de líquido. Dessa forma, tornou-se possível construir gráficos de volume acumulado de metano versus tempo.

Os ensaios de atividades metanogênicas (AM) foram realizados utilizando metodologia adaptada de Monteggia (1991). Os microrganismos não passaram por nenhum processo de inativação nesta etapa. O teste AM seguiu as seguintes etapas:

- determinação de sólidos suspensos voláteis (SSV) do lodo antes de iniciar os testes;
- ajuste da concentração de sólidos suspensos voláteis dos lodos testados a fim de obter uma faixa de concentração entre 2,0 e 4,0 g SVT.L<sup>-1</sup>;
- adição de solução nutriente nos reatores;
- substituição do ar atmosférico contido na *headspace* do reator por *stripping* utilizando gás nitrogênio;
- ambientação do consórcio microbiano às condições do experimento, por um período de 24h;

- alimentação dos reatores com o substrato (acetato de sódio 10 %) através do septo de borracha, obtendo-se uma concentração de DQO de  $2\text{g.L}^{-1}$ . A partir desta etapa, foram iniciados os testes;

- coleta de amostras do biogás gerado imediatamente após a adição de substrato e periodicamente até o fim do experimento;

- análise, ao final do teste, da mistura lodo e água de diluição para determinação de pH, sólidos suspensos voláteis, DQO solúvel e subprodutos formados na fase líquida;

- cálculo da atividade metanogênica específica utilizando-se o método da maior tangente.

Para isso, modelou-se a curva de produção de metano, utilizando uma função polinomial mais adequada. A partir da derivada desta função obtiveram-se os valores dos pontos tangentes à curva polinomial obtida e o maior valor da tangente foi utilizado. Dividiu-se este valor pela concentração de biomassa contida no digestor. O cálculo da atividade metanogênica pode ser equacionado pela Equação 3.

$$\text{AME} = \frac{\Delta P_{\text{met}}}{\Delta t \cdot \text{SVT}} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

AME: atividade metanogênica específica ( $\text{mL CH}_4 \cdot \text{mg}^{-1} \text{SSV} \cdot \text{h}^{-1}$ );

$\Delta P_{\text{met}}$ : produção acumulada de  $\text{CH}_4$  (mL);

$\Delta t$ : intervalo de tempo (h);

SVT: sólidos voláteis totais ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

As tabelas a seguir apresentam informações sobre os respectivos experimentos realizados ao longo deste estudo, na totalidade de doze experimentos utilizando-se três reatores em cada um deles. Em quatro experimentos foi utilizada amostra bruta de vinhoto residual pós-processo acidogênico. Nos outros oito experimentos foram utilizadas amostras brutas compostas por vinhoto e glicerol, em composições de 80/20 (V/G); 60/40 (V/G) e 20/80 (V/G).

Tabela 3: Dados relativos ao experimento V1, com amostra bruta DQO de 11.140 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	11.140	185,08	561,04	1.753,88
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	11.140	185,08	1.122,08	1.192,84
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	11.140	185,08	1.683,11	631,81

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 4: Dados relativos ao experimento V2, com amostra bruta DQO de 16.847 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.847	185,08	370,98	1.943,94
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.847	185,08	741,96	1.572,96
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	16.847	185,08	1.112,94	1.201,98

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 5: Dados relativos ao experimento V3, com amostra bruta DQO de 16.167 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.167	185,08	386,59	1.928,33
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.167	185,08	773,18	1.541,74
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	16.167	185,08	1.159,76	1.155,16

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 6: Dados relativos ao experimento V4, com amostra bruta DQO de 21.440 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	21.440	185,08	291,50	2.023,42
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	21.440	185,08	583,00	1.731,92
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	21.440	185,08	874,50	1.440,42

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 7: Dados relativos ao experimento VG1, com amostra bruta DQO de 17.142 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto e glicérol (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	17.142	185,08	364,58	1.950,34
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	17.142	185,08	729,17	1.585,75
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	17.142	185,08	1.093,75	1.221,17

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 8: Dados relativos ao experimento VG2, com amostra bruta DQO de 18.522 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto e glicerol (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	18.522	185,08	337,43	1.977,49
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	18.522	185,08	674,87	1.640,05
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	18.522	185,08	1.012,30	1.302,62

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 9: Dados relativos ao experimento VG3, com amostra bruta DQO de 16.764 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto e glicerol (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.764	185,08	372,81	1.942,11
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.764	185,08	745,61	1.569,31
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	16.764	185,08	1.118,42	1.196,50

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 10: Dados relativos ao experimento VG4, com amostra bruta DQO de 15.888 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto e glicerol (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	15.888	185,08	393,36	1.921,56
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	15.888	185,08	786,73	1.528,19
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	15.888	185,08	1.180,09	1.134,83

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 11: Dados relativos ao experimento VG5, com amostra bruta DQO de 16.380 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto e glicerol (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.380	185,08	381,56	1.933,36
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.380	185,08	763,12	1.551,80
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	16.380	185,08	1.144,69	1.170,23

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 12: Dados relativos ao experimento VG6, com amostra bruta DQO de 16.052 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto e glicerol (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.052	185,08	389,35	1.925,57
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.052	185,08	778,70	1.536,22
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	16.052	185,08	1.168,05	1.146,87

Fonte: Autor, 2016.



Tabela 13: Dados relativos ao experimento VG7, com amostra bruta DQO de 21.035 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto e glicerol (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	21.035	185,08	297,26	2.017,66
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	21.035	185,08	594,52	1.720,40
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	21.035	185,08	891,78	1.423,14

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 14: Dados relativos ao experimento VG8, com amostra bruta DQO de 11.633 (mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	V SVT (mL)	V vinhoto e glicerol (mL)	DELTAV
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	11.633	185,08	537,26	1.777,66
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	11.633	185,08	1.074,52	1.240,40
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	11.633	185,08	1.611,79	703,13

Fonte: Autor, 2016.

### 5.3 CINÉTICA DE PRODUÇÃO DE METANO

Foi utilizado o método da tangente (BEAL, 2004). Este método consiste nos seguintes passos básicos:

- construção de gráficos de volume acumulado de metano versus tempo;
- modelação da curva obtida, usando uma função matemática onde o volume acumulado de metano varia em função do tempo, o qual pode ser definido como  $y=f(x)$ ;
- derivação da função obtida,  $y'=f'(x)$ , avaliada no período de tempo do experimento, obtendo assim a taxa máxima de produção de metano o que equivale a:

$$y' = (dVCH_4/dt)$$

Com o valor obtido, dividido pela concentração de biomassa, foi possível obter a taxa específica de produção de metano.

### 5.4 ANÁLISES PARA MONITORAMENTO

Foram efetuadas análises de ácidos graxos voláteis, composição do biogás gerado, de pH, de sólidos suspensos voláteis e sólidos suspensos totais. Os métodos de análise são os seguintes:

#### 5.4.1 Análise da composição de gases

As amostras de gás retiradas diretamente do reator, através do septo de borracha instalado, com seringa de 100  $\mu$ l com trava, foram analisadas por cromatografia a gás. O cromatógrafo utilizado foi o Dani Master AS, com coluna Carboxen<sup>TM</sup> 1006 PLOT Capillary Column (30 m x 0,53 mm), com detector de condutividade térmica (TCD-Thermal Conductivity Detector), tendo gás nitrogênio ultra puro como gás de arraste, conforme Figura 5.



Figura 5 – Equipamentos utilizados para análise da composição de gases  
Fonte: Autor, 2016.

Com análise cromatográfica, foi possível estabelecer as frações de metano, gás carbônico, nitrogênio e hidrogênio produzidas separadamente e que foram amostradas em intervalos de tempos definidos em cada perfil.

As condições operacionais para análise de gases são as seguintes:

- a) volume de injeção: 100  $\mu$ L

- b) temperatura do injetor: 100 °C
- c) fluxo da Coluna: 5,5 mL.min<sup>-1</sup>
- d) temperatura da coluna: 40 °C

#### **5.4.2 Análise de sólidos totais, DQO e pH**

Para determinação do teor de sólidos totais, as amostras foram filtradas com filtro de fibra de vidro com tamanho de poro igual a 1,2 µm, após a amostra foi transferida para estufa a 105°C até que sua massa se mantivesse constante e o peso final obtido após 1 hora em mufla à temperatura de 550°C.

As análises de DQO foram analisadas através do método de refluxo fechado por titulometria. O pH foi analisado através de peagâmetro digital e a temperatura por termômetro.

Todas as análises descritas foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LATAM) e as técnicas utilizadas obedeceram aos procedimentos estabelecidos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A produção de metano obtida através da digestão anaeróbia de vinhoto e glicerol, em cada experimento, foi mensurada utilizando-se método em escala de bancada. Os principais resultados são discutidos em dois artigos submetidos à Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, apresentados a seguir.

## 6.1 ARTIGO I - PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE VINHOTO COMO PÓS TRATAMENTO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

### PRODUÇÃO DE METANO COM EFLUENTE DE PROCESSO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO UTILIZANDO VINHOTO METHANE PRODUCTION WITH EFFLUENT OF HYDROGEN PRODUCTION PROCESS USING VINASSE

Steffens F.H.; Lovatel E. R.; Beal L. L.

#### RESUMO

Um dos resíduos com grande potencial de produção de biometano é o vinhoto gerado na produção de etanol. Um litro de etanol produzido gera até quinze litros de vinhoto, com valores de DQO variando de 20 g O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> a 60 g O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>, o que representa um elevado potencial poluidor. Neste contexto, este estudo avaliou quatro experimentos em processo anaeróbio em escala de bancada para produção de metano, utilizando efluente de processo anaeróbio tendo vinhoto como substrato para produção de biohidrogênio. Foram determinados parâmetros de produção de metano e velocidade específica de produção de metano, entre outros aspectos. Os três reatores dos quatro experimentos que apresentaram resultados mais significativos em termos de produção de metano no período de tempo monitorado, foram o V4.3, V2.3 e o V3.3, em volumes de 6.241 mL, 6.087 mL e 4.845 mL, respectivamente. Os valores mais significativos de atividades metanogênicas foram obtidos quando o vinhoto foi submetido a um processo de produção de hidrogênio com valores de pH 4,5 e 6,5, respectivamente.

**Palavras chave: vinhoto; metano; reatores; anaeróbio.**

#### ABSTRACT

One of the residues with great bioethanol production potential is the vinasse generated in the production of ethanol. One liter of ethanol produced generates up to fifteen liters of vinasse, with COD values varying from 20 g O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> to 60 g O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>, which represents a high polluting potential. In this context, this study evaluated four experiments in anaerobic process on bench scale for methane production using anaerobic process effluent having vinasse as a substrate for biohydrogen production. Methane production parameters and specific velocity of methane

production were determined, among other aspects. The three reactors of the four experiments that presented the most significant results in terms of methane production in the monitored time period were V4.3, V2.3 and V3.3, in volumes of 6,241 mL, 6,087 mL and 4,845 mL, respectively. The most significant values of methanogenic activities were obtained when the vinasse was submitted to a hydrogen production process with pH values of 4.5 and 6.5, respectively.

**Key words: vinasse; methane; reactors; anaerobic.**

## INTRODUÇÃO

Dentre os resíduos potencialmente poluidores gerados pelas diversas atividades industriais, existem aqueles que são degradados naturalmente, porém, são gerados em quantidades tais que, até serem degradados pelo ambiente, promovem impactos ambientais negativos, a exemplo dos resíduos provenientes da atividade sucroalcooleira.

O setor sucroalcooleiro constitui o principal agronegócio brasileiro. Na safra 2005/2006, a moagem foi de 431,4 milhões de toneladas de cana, que resultou na produção de 26,7 milhões de toneladas de açúcar e 17 bilhões de litros de álcool. Em 2006, o parque sucroalcooleiro nacional possuía 320 indústrias em atividade, sendo 227 na região Centro-Sul e 94 na região Norte-Nordeste, que impulsionavam a atividade econômica de mais de 1.000 municípios brasileiros. Havia, ainda, no país, perto de 30 projetos em fase de implantação (DIEESE, 2007). Para a safra 2016/2017, são projetadas 684,77 milhões de toneladas de cana, representando acréscimo de 2,9% em relação a safra anterior (CONAB, 2016) e um aumento de 58,73% sobre a safra 2005/2006. Já, a quantidade de indústrias aumentou para 371, representando um aumento de 16%. Levando-se em consideração que, para a produção de etanol, é gerado volume residual de vinhoto na proporção de dez a quinze vezes superior em relação ao etanol produzido, pode-se afirmar que o tratamento deste efluente é de suma importância para a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro.

A fim de atenuar tais impactos ambientais, visando uma gestão ambiental adequada da atividade sucroalcooleira e em consonância as prerrogativas legais existentes, a aplicação de processos anaeróbios pode contribuir de forma substancial para o setor. Isto por que, levando-se em consideração a geração em nível nacional de aproximadamente trinta milhões de metros cúbicos de álcool por ano e uma geração média de vinhoto de 12,5 L/L etanol, há uma carga estimada de DQO a ser reduzida de doze milhões de toneladas de oxigênio para a estabilização deste efluente.

Os reatores do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) representam tecnologia anaeróbia para tratamento direto de efluentes, promovendo a possibilidade de mitigar impactos ambientais associados à atividade industrial, gerando ainda biogás, o qual pode representar alternativa de rentabilidade econômica para o setor.

Barros et al. (2015) utilizaram resíduos de suinocultura para partida de reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), em experimento com processo de digestão anaeróbia com posterior alimentação dos reatores com vinhoto bruto, proveniente de plantio de cana em Ribeirão Preto, São Paulo. O volume de lodo de resíduos da suinocultura atingiu 30% do volume de cada reator, com o restante sendo preenchido pelo vinhoto natural. A média da eficiência de remoção de DQO foi de aproximadamente 70 a 80%, tendo atingido até 82% de eficiência máxima pelos reatores UASB. Este estudo, que também analisou a conversão anaeróbia do vinhoto em biometano com aumento gradual da carga orgânica em dois reatores UASB, com volumes de 40,5 e 21,5 litros e com operação em temperatura mesófila, verificou produções máximas de metano na ordem de  $0,19 \text{ L. (g DQO total removido)}^{-1}$ , alcançadas após 140 dias de operação dos reatores.

Segundo Zanette (2009), os resíduos agropecuários no Brasil possuem um potencial de produção de metano de 66,3 milhões de  $\text{m}^3\text{d}^{-1}$  e os efluentes industriais em potencial de 12,7 milhões de  $\text{m}^3\text{.d}^{-1}$ .

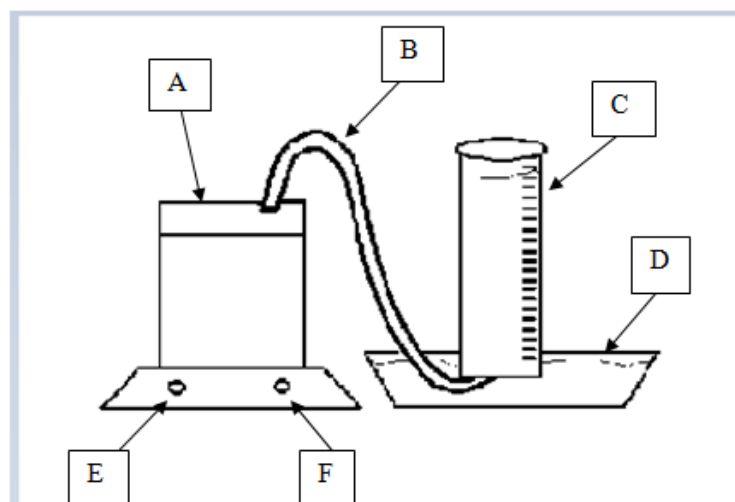
Tendo em vista que o setor sucroalcooleiro representa um dos segmentos do agronegócio brasileiro mais importantes da atualidade, o aproveitamento da energia renovável proveniente dos dejetos da atividade na forma de biogás vem recebendo especial atenção, como uma forma eficaz de mitigar impactos ambientais e sanitários. Neste trabalho, foi utilizado processo anaeróbio em escala de bancada para avaliar a eficiência do processo com vinhoto residual de um processo de produção de hidrogênio.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O experimento foi realizado no Laboratório de Tecnologias Ambientais da Universidade de Caxias do Sul (LATAM/UCS).

## Unidade experimental

Os experimentos foram realizados em reatores, conforme Figura 1 e 2, os quais possuíam um volume total de 3,2 L, sendo o volume útil de 2,5 L. Os reatores foram confeccionados em acrílico.



- A = reator utilizado nos experimentos avaliados  
 B = mangueira para passagem do biogás produzido  
 C = proveta invertida para medição do biogás produzido  
 D = recipiente com água pH 12  
 E = controle do agitador magnético  
 F = controle da temperatura

Figura 1: Esquema da unidade experimental.

Fonte: Autor (2016)

Para garantir a completa mistura dentro do reator, foram utilizados agitadores magnéticos com placa de aquecimento, garantindo aos reatores a temperatura de  $37 \pm 2$  °C. Os reatores foram vedados em todas as suas extremidades com silicone, evitando perda de gás. A estanqueidade foi testada em teste de imersão em água com injeção de ar. O biogás produzido foi medido por deslocamento de líquido, em uma proveta invertida externa ao reator. O líquido utilizado no sistema foi água com pH 12, para proporcionar a solubilização do gás carbônico e permitir somente o deslocamento do líquido pelo gás metano. O volume de produção de metano, foi normalizado para 20 °C.

## Substrato

O substrato utilizado para os estudos de produção de metano foi o vinhoto tratado anteriormente por processo anaeróbio para produção de hidrogênio. No processo de geração de hidrogênio, a fase preponderante é a acidogênese, ou seja, houve também, além da



produção de hidrogênio, uma elevada produção de ácidos. Os valores de pH utilizados nesta etapa foram 5,5, 4,5, 6,5 e 4,5, respectivamente, para os experimentos V1, V2, V3 e V4

Após este primeiro tratamento, o vinhoto foi filtrado para retenção da biomassa produtora de hidrogênio e então submetido ao tratamento com biomassa anaeróbia, em reatores de mistura mecânica operando em batelada.

### Avaliação de produção de metano

As condições operacionais testadas foram baseadas pela caracterização do substrato em cada um dos doze experimentos avaliados, com composições de vinhoto residual pós-processo acidogênico. Inicialmente foi realizado ensaio de Atividade Metanogênica, utilizando a metodologia proposta por Monteggia (1991). Os testes de biodegradabilidade anaeróbia foram baseados na metodologia proposta por Monteggia (1991) para os ensaios de Atividade Metanogênica. A concentração de SVT para todos os ensaios foi de 5.000 mg.L<sup>-1</sup>.

A concentração de DQO inicial para os experimentos de estudo de geração de metano estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: DQO inicial dos substratos de cada experimento.

Experimento	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
V1	11.140
V2	16.847
V3	16.167
V4	21.440

Fonte: Autor, 2016.

As tabelas a seguir apresentam informações sobre as condições iniciais dos quatro experimentos (V1, V2, V3 e V4) conduzidos neste estudo.

Tabela 2: Dados relativos ao experimento V1.

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	11.140
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	11.140
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	11.140

Tabela 3: Dados relativos ao experimento V2.

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.847
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.847
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	16.847

Tabela 4: Dados relativos ao experimento V3.

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.167
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.167
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	16.167

Tabela 5: Dados relativos ao experimento V4.

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	21.440
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	21.440
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	21.440

Fonte: Autor, 2016.

### Avaliação da produção de metano

Foi utilizado o método da tangente (BEAL, 2004). Este método consiste nos seguintes passos básicos:

- construção de gráficos de volume acumulado de metano versus tempo;
- modelação da curva obtida, usando uma função matemática onde o volume acumulado de metano varia em função do tempo, o qual pode ser definido como  $y = f(x)$ ;
- derivação da função obtida,  $y' = f'(x)$ , avaliada no período de tempo do experimento, obtendo assim a taxa máxima de produção de metano o que equivale a:

$$y' = \left( \frac{dvCH_4}{dt} \right)$$

Com o valor obtido, dividido pela quantidade mássica de biomassa, é possível obter a taxa específica de produção de metano.

Para a apresentação dos dados relativos a produção de metano, foi utilizado o Origin Pro versão 8.1, software de gráfico para análise de dados e estatística desenvolvido pela Originlab.

### Análises físicas e químicas

Foram efetuadas análises de ácidos graxos voláteis, composição do biogás gerado, de pH, de sólidos suspensos voláteis e sólidos suspensos totais. As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LATAM) e as técnicas utilizadas obedeceram aos procedimentos estabelecidos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), conforme Tabela 6.

Tabela 6: Procedimentos analíticos estabelecidos

<b>Análise</b>	<b>Método (APHA)</b>	<b>Ano</b>
<b>DQO</b>	5220C 22nd Edition	2012
<b>Sólidos Suspensos Totais</b>	2540D 22nd Edition	2012
<b>Sólidos Suspensos Voláteis</b>	2540D 22nd Edition	2012
<b>Sólidos Voláteis Totais</b>	2540E 22nd Edition	2012
<b>pH</b>	2320C 22nd Edition	2012

Fonte: Autor (2016)

### **Análise da composição de gases**

As amostras de gás retiradas diretamente do reator, através do septo de borracha instalado, com seringa de 100 µl com trava, foram analisadas por cromatografia gasosa. O cromatógrafo utilizado foi modelo Dani Master AS, com coluna Carboxen TM 1006 PLOT Capillary Column (30mx0,53mm), com detector de condutividade térmica (TCD – Thermal Conductivity Detector), tendo gás nitrogênio ultra puro como gás de arraste.

As condições operacionais para análise de gases são as seguintes: volume de injeção de 100 µL; temperatura do injetor de 100 °C; fluxo da coluna de 5,5 mL.min<sup>-1</sup> e temperatura da coluna de 40°C.

### **Análise da composição de ácidos orgânicos voláteis**

O cromatógrafo a gás utilizado foi um Shimadzu GC 2010 plus acoplado a um detector de ionização de chama (FID), coluna DANI DN-FFAP 11448 e gás de arraste hélio. As condições operacionais para análise de gases são as seguintes: volume de injeção de 1 µL; temperatura do injetor de 200 °C; fluxo da coluna de 1,0 mL.min<sup>-1</sup> e temperatura da coluna de 100°C.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A seguir são apresentados os resultados dos experimentos realizados, em relação a produção de metano e avaliação cinética.

### **Produção de metano**

Foram conduzidos quatro experimentos utilizando-se efluente de um processo anaeróbio para produção de hidrogênio, tendo vinhoto como. As produções de metano obtidas em cada experimento estão apresentadas na Tabela 7.

As produções de metano do reator 1 do experimento V2, reator 2 do experimento V3 e reator 3 do experimento V4 foram, respectivamente, 6.087 mL, 4.804 mL e 6.241 mL. Esses valores são similares aqueles encontrados por Xia et al. (2011), em experimento anaeróbio utilizando resíduos de suinocultura e lodo de matadouro para produção de biogás com aditivo de penas de galinhas.

Barros et al. (2015), em estudo que avaliou a conversão anaeróbia do vinhoto em biometano, operando reatores UASB, com tempos de detenção distintos, verificaram uma produção máxima de metano de  $0,8 \text{ L} \cdot (\text{L reator} \cdot \text{d})^{-1}$  a  $1,3 \text{ L} \cdot (\text{L reator} \cdot \text{d})^{-1}$ .

As maiores produções de metano ocorreram nos experimentos onde o vinhoto foi previamente tratado para produção de hidrogênio com valores de pH de 4,5 (experimentos V2 e V4) e 6,5 (experimento V3). De acordo com os valores de ácidos apresentados na Tabela 8, houve uma significativa conversão desses a metano. A conversão de ácido acético, propiônico e butírico alcançou valores de 100% em diversos experimentos, o que indica uma ótima associação entre os microrganismos envolvidos na etapa de produção de ácido acético e produção de metano.

As eficiências de remoção de DQO foram variáveis, porém com exceção do reator 1 no experimento V1, sempre foram observados valores acima de 80%.

Tabela 7: Produções de metano observadas nos experimentos,

Experimento	Reator	So ( $\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ )	Sf ( $\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ )	E (%)	Vol. CH <sub>4</sub> (mL)	pH inicial	pH final
V1	1	2.500	1.354	46,0	2.605	6,83	7,11
	2	5.000	859	83,0	3.234	6,81	7,72
	3	7.500	1.456	80,6	4.015	6,8	7,19
V2	1	2.500	1.223	51,0	2.856	7,13	7,47
	2	5.000	910	82,0	4.212	6,83	7,28
	3	7.500	1.661	78	6.087	6,96	7,03
V3	1	2.500	260	89,6	2.766	7,41	7,22
	2	5.000	500	90,0	4.804	7,10	7,32
	3	7.500	2.353	85,0	4.845	7,0	7,11
V4	1	2.500	250	90,0	2.679	7,17	7,10
	2	5.000	300	94	4.470	6,93	7,35
	3	7.500	923	88,0	6.241	6,82	7,47

Fonte: Autor (2016)

Tabela 8: Consumo de ácidos nos experimentos.

<b>V1</b>						
<b>Reator</b>	<b>Ácido Acético (mg/L)</b>		<b>Ácido Propiônico (mg/L)</b>		<b>Ácido Butírico (mg/L)</b>	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
<b>1</b>	5.100	44,65	1.000	68,81	4.800	N.D.
<b>2</b>	5.100	21,74	1.000	31,78	4.800	N.D.
<b>3</b>	5.100	14,35	1.000	N.D.	4.800	N.D.

<b>V2</b>						
<b>Reator</b>	<b>Ácido Acético (mg/L)</b>		<b>Ácido Propiônico (mg/L)</b>		<b>Ácido Butírico (mg/L)</b>	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
<b>1</b>	480	N.D.	600	N.D.	470	N.D.
<b>2</b>	480	10,24	600	N.D.	470	N.D.
<b>3</b>	480	12,73	600	N.D.	470	N.D.

<b>V3</b>						
<b>Reator</b>	<b>Ácido Acético (mg/L)</b>		<b>Ácido Propiônico (mg/L)</b>		<b>Ácido Butírico (mg/L)</b>	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
<b>1</b>	250	8,3	800	N.D.	300	N.D.
<b>2</b>	250	125,12	800	165,46	300	21,29
<b>3</b>	250	8,8	800	N.D.	300	N.D.

<b>V4</b>						
<b>Reator</b>	<b>Ácido Acético (mg/L)</b>		<b>Ácido Propiônico (mg/L)</b>		<b>Ácido Butírico (mg/L)</b>	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
<b>1</b>		27,98		42,26		N.D.
<b>2</b>		23,94		32,04		N.D.
<b>3</b>		20,96		N.D.		N.D.

Os substratos utilizados nos experimentos V2 e V4, os quais foram objetos de estudo de produção de hidrogênio com pH 4,5, apresentaram maior produção de metano. Dessa forma pode-se concluir que, para melhor obtenção de metano, em um processo anaeróbio posterior ao de produção de hidrogênio, o melhor valor de pH é 4,5 com concentrações iniciais de DQO de  $5.000 \text{ mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$  e  $7.500 \text{ mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ .

### **Avaliação Cinética**

Em termos de cinética de produção de metano, os resultados dos quatro experimentos demonstraram elevadas velocidades de produção de metano nas primeiras horas de monitoramento. Os maiores valores de produção de metano foram observados nas dez horas iniciais de operação dos reatores e, posteriormente, a produção de metano ocorreu a uma taxa menor, conforme pode ser visualizado nas Figuras 2.1 a 5.3. Este comportamento pode ser explicado pela conversão de compostos facilmente biodegradáveis presentes no efluente tratado, proporcionando altas taxas de produção de metano no início dos experimentos. Estes

compostos facilmente biodegradáveis são os ácidos orgânicos acético, propiônico e butírico, os quais estavam com concentrações elevadas (Tabela 1) no início do experimento.

Os valores das velocidades de produção de metano em todos os experimentos variaram de  $128,96 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$  a  $368,33 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$  enquanto que Xia et al. (2011) verificaram  $97,2 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Com relação aos resultados do experimento V1, conforme apresentado nas figuras 2.1, 2.2 e 2.3, o reator 1 apresentou produção de metano de 2.129 mL entre a vigésima terceira hora e a trigésima segunda, ou seja, em período correspondente a nove horas de experimento, ocorreu produção de metano equivalente a 65,8% do volume total gerado no reator, que foi de 3.234 mL.

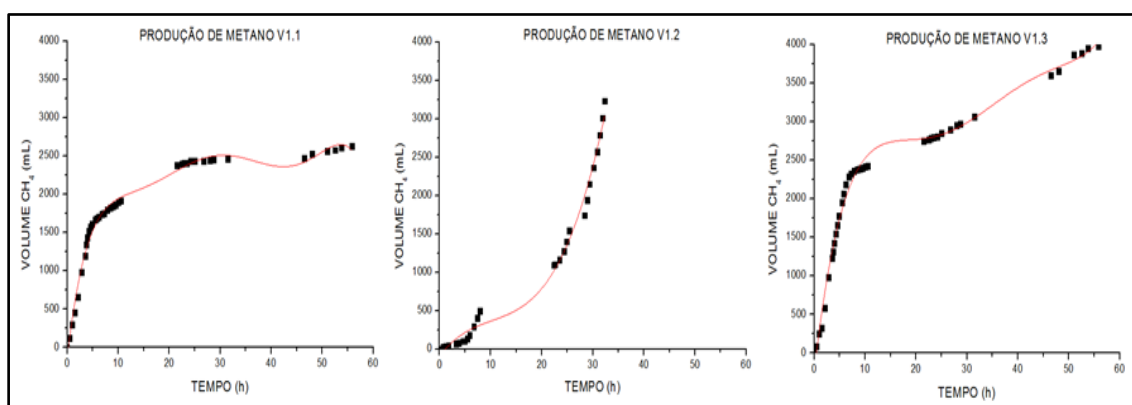


Figura 2: 2.1 - Produção de metano no reator 1, experimento V1. Eq.  $y = -1,098x^3 + 17,91x^2 - 31,81x$ ;  $R^2 = 0,996$ ;

2.2 - Produção de metano no reator 2, experimento V1. Eq.  $y = -9E-06x^6 + 0,001x^5 - 0,107x^4 + 3,624x^3 - 63,12x^2 + 569,1x - 137,0$ ;  $R^2 = 0,989$ ;

2.3 - Produção de metano no reator 3, experimento V1. Eq.  $y = -9E-07x^6 + 0,000x^5 - 0,031x^4 + 1,676x^3 - 44,92x^2 + 587,6x - 260,3$ ;  $R^2 = 0,991$

Fonte: Autor (2016)

Importante salientar que este pico de produção de metano ocorreu vinte e três horas após o início da operação do reator. Logo nas primeiras dez horas de experimento, o reator 2 produziu cerca de 2.000 mL de metano, conversão metanogênica que equivale a 76,8% do total produzido pelo reator.

O reator 3 apresentou comportamento similar ao do reator 2, onde 2.577 mL de metano foram produzidos nas primeiras dez horas de operação, equivalente a 64,2% do total de metano produzido ao longo do tempo.

Em relação ao experimento V2, este apresentou um comportamento similar ao do experimento V1, como demonstrado na Figura 3. Em relação ao reator 2, houve uma tendência linear durante todo o tempo de produção de metano, com incrementos gradativos de volume ao longo do tempo.

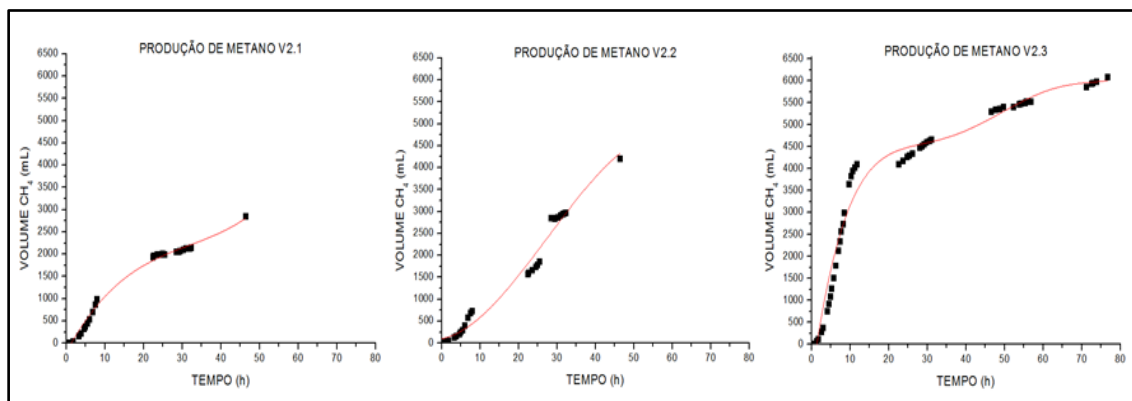


Figura 3. 3.1 – Produção de metano no reator 1, experimento V2. Eq.  $y = 3E-05x^5 - 0,007x^4 + 0,695x^3 - 30,3x^2 + 639,8x - 837,4$  ;  $R^2 = 0,968$   
 3.2-Produção de metano no reator 2, experimento V2. Eq.  $y = -0,044x^3 + 3,642x^2 + 16,69x + 98,28$  ;  $R^2 = 0,974$   
 3.3 - Produção de metano no reator 3, experimento V2. Eq.  $y = 0,042x^3 - 4,029x^2 + 161,0x - 204,2$  ;  $R^2 = 0,989$   
 Fonte: Autor (2016)

Neste caso, o reator 2 apresentou produtividade de apenas 574 mL de metano nas primeiras dez horas, equivalente a 13,6% do total produzido pelo reator. Importante salientar que o período de maior produção de metano neste reator, ocorreu entre a vigésima e a trigésima terceira hora de operação, com produtividade aproximada de 3.000 mL de metano, o que equivale a 35,6% do total produzido pelo reator, em somente treze horas de operação. Já o reator 3, registrou produção de 1.074 mL de metano nas primeiras dez horas de operação, representando cerca de 38% do total produzido pelo reator em quarenta e seis horas.

Os resultados do experimento V3 são similares ao do V2, com os reatores 1 e 2 apresentando significativos incrementos de metano nas primeiras dez horas. Já o reator 3, demonstrou resultados similares ao reator 2 do experimento V2, com gradativas produções de metano ao longo do tempo. Destaque para o reator 1 do experimento V3, o qual produziu 2.037 mL de metano nas primeiras dez horas de operação, representando cerca de 73,6% de todo o volume produzido pelo reator, conforme demonstram as figuras 4.1, 4.2 e 4.3.

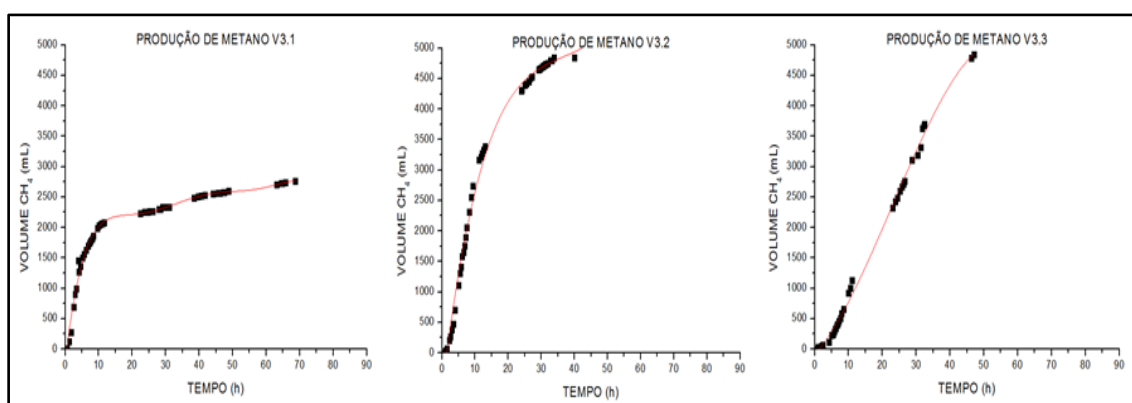


Figura 4. 4.1 – Produção de metano no reator 1, experimento V3. Eq.  $y = -1E-06x^6 + 0,000x^5 - 0,030x^4 + 1,490x^3 - 37,75x^2 + 478,7x - 211,9$  ;  $R^2 = 0,989$   
 4.2-Produção de metano no reator 2, experimento V3. Eq.  $y = -0,001x^4 + 0,210x^3 - 14,57x^2 + 453,7x - 637,4$  ;  $R^2 = 0,992$   
 4.3- Produção de metano no reator 3, experimento V3. Eq.  $y = -0,044x^3 + 3,031x^2 + 60,09x - 81,53$  ;  $R^2 = 0,996$

Fonte: Autor (2016)

Quanto aos resultados dos três reatores do experimento V4, pode-se afirmar que em todos os reatores houve significativo volume de produção de metano nas primeiras dez horas de operação.

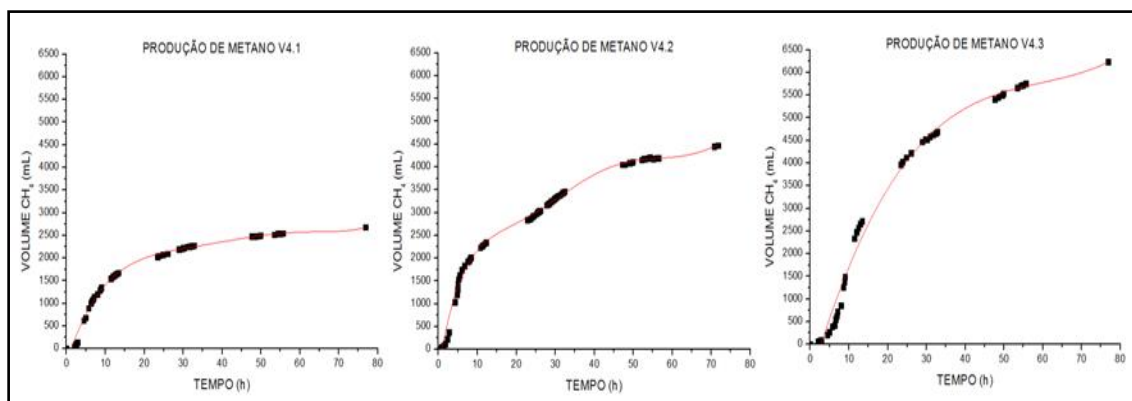


Figura 5. 5.1 – Produção de metano no reator 1, experimento V4. Eq.  $y = 1E-05x^5 - 0,003x^4 + 0,274x^3 - 11,83x^2 + 264,2x - 297,9$ ;  $R^2 = 0,989$

5.2-Produção de metano no reator 2, experimento V4. Eq.  $y = -1E-06x^6 + 0,000x^5 - 0,027x^4 + 1,407x^3 - 36,50x^2 + 508,6x - 419,8$ ;  $R^2 = 0,993$

5.3 - Produção de metano no reator 3, experimento V4. Eq.  $y = 0,025x^3 - 4,563x^2 + 291,2x - 772,5$ ;  $R^2 = 0,985$

Fonte: Autor (2016)

Ressalta-se o reator 1, o qual produziu 1.488 mL de metano no período, correspondente a 55,5% do montante produzido por este reator durante todo o tempo de monitoramento da sua operação, que foi de aproximadamente setenta e sete horas.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados de velocidade de produção de metano e de velocidade específica de produção de metano para cada um dos reatores avaliados nos quatro experimentos. Os maiores valores de velocidade específica de produção de metano foram observados nos reatores 1 e 2 dos experimentos V1, V2 e V4, os quais operaram com concentrações iniciais de DQO de  $5.000 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  e  $7.500 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ . Além disso, outro ponto a colaborar para essas maiores velocidades específicas são as concentrações elevadas de ácidos orgânicos rapidamente biodegradáveis no início do experimento (Tabela 8).

Tabela 9: Velocidades de produção de metano

EXPERIMENTO	Velocidade de produção de metano ( $\text{mL} \cdot \text{h}^{-1}$ )	SVT (g)	Velocidade específica de produção de metano ( $\text{mmol CH}_4 \cdot \text{gSSV}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )
V 1.1	185,29	12,5	0,66
V 1.2	217,24	12,5	0,78
V 1.3	199,30	12,5	0,71
V 2.1	122,83	12,5	0,44
V 2.2	117,29	12,5	0,42



V 2.3	368,33	12,5	1,32
V 3.1	204,85	12,5	0,73
V 3.2	326,50	12,5	1,17
V 3.3	128,96	12,5	0,46
V 4.1	170,69	12,5	0,61
V 4.2	233,79	12,5	0,84
V 4.3	250,41	12,5	0,89

Fonte: Autor (2016)

Como todos os reatores operaram em uma faixa de pH ótima para metanogênese, provavelmente o fator que mais influenciou as maiores velocidades específicas de produção de metano foram as condições operacionais para produção de hidrogênio.

## CONCLUSÕES

Os resultados apresentaram-se satisfatórios com relação a produção de metano através da conversão do vinhoto como pós-tratamento de produção de hidrogênio. Os melhores valores de velocidade específica de produção de metano, foram obtidos com concentrações iniciais de DQO de 5.000 mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> e 7.500 mg O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> o que propiciou valor de 1,315 mL CH<sub>4</sub>.gSVT<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup> e de 1,17 mL CH<sub>4</sub>.gSVT<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>. A produção máxima de metano para os experimentos foi de 6.241 mL e 6.087 mL, sendo eles os experimentos V4.3 e V2.3. Os valores obtidos para todos os experimentos remetem a conclusão de que é possível e interessante, sob o ponto de vista de obtenção de biocombustíveis, associar um processo de produção de metano a um processo de produção de biohidrogênio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, V. G; DUDA, R. M.; OLIVEIRA R. A. **Biomethane production from vinasse in upflow anaerobic sludge blanket reactors inoculated with granular sludge.** BrazilianJournalofMicrobiology.São Paulo, 2015.

BEAL, L. L. **Tratamento anaeróbico de efluente de curtume de acabamento associado a membranas de micro e ultrafiltração.** Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Cana de Açúcar.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016.

DIEESE – Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos. Disponível em: <[http://www.dieese.org.br/estudosepesquisas/2007/estpesq30\\_setorSucroalcooleiro.pdf](http://www.dieese.org.br/estudosepesquisas/2007/estpesq30_setorSucroalcooleiro.pdf)>  
Acesso em: 24.09.2016.

MONTEGGIA, L.O. **The use of specific methanogenic activity for controlling anaerobic reactors.** University of Newcastle Upon Tyne, 1991.

XIA YUN.; MASSÉ D. I.; McALLISTER T.A.; BEAULIEU C.; UNGERFELD E. **Anaerobic digestion of chicken feather with suine manure or slaughterhouse sludge for biogas production.** Waste Management, 2011.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético de biogás no Brasil.** Dissertação. UFRJ / COPPE / Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2009.

## 6.2 ARTIGO II - PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHOTO E GLICEROL

### PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE EFLUENTE DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHOTO E GLICEROL

### METHANE PRODUCTION FROM EFFLUENT OF VINASSE AND GLYCEROL ANAEROBIC CODIGESTION

Steffens F.H.; Lovatel E. R.; Beal L. L.

#### RESUMO

Levando-se em consideração a importância econômica que a indústria sucroalcooleira e do biodiesel representam para o Brasil, bem como a posição de destaque do país neste cenário econômico mundial, uma gestão adequada do efluente gerado pelas indústrias torna-se fundamental. A fim de minimizar os impactos ambientais associados, tendo em vista que um litro de etanol produzido gera até quinze litros de vinhoto e que cada tonelada de biodiesel gera cem quilos de glicerol, tecnologias disponíveis podem ser utilizadas, como no caso de processos anaeróbios. Este estudo avaliou oito experimentos em processo anaeróbio em escala laboratorial utilizando efluente de vinhoto e glicerol pós tratamento por processo de acidogênese, oriundo da indústria sucroalcooleira e do biodiesel. Foram determinados parâmetros de produção de metano, entre outros aspectos. Os resultados apresentaram produções máximas de metano de 8.687 mL, 7.990 mL e 6.640 mL, para relações de proporções de vinhoto e glicerol de 80/20, 60/40 e 20/80, respectivamente.

**Palavras-chave: codigestão anaeróbia, vinhoto, glicerol, metano.**

#### ABSTRACT

Taking into account the economic importance that the sugar-alcohol industry and biodiesel represent for Brazil, as well as the country's leading position in this world economic scenario, adequate management of the effluent generated by the industries becomes fundamental. In order to minimize the associated environmental impacts, given that one liter of ethanol

produced generates up to fifteen liters of vinasse and that each ton of biodiesel generates one hundred kilos of glycerol, available technologies can be used, as in the case of anaerobic processes. This study evaluated eight experiments in anaerobic process in laboratory scale using effluent of vinasse and glycerol post treatment by acidogenesis process, coming from the sugar and alcohol industry and biodiesel. Methane production parameters were determined, among other aspects. The results showed maximum methane yields of 8,687 mL, 7,990 mL and 6,640 mL, for 80/20, 60/40 and 20/80 ratio of vinasse and glycerol, respectively.

**Key words: anaerobic codigestion, vinasse, glycerol, methane.**

## INTRODUÇÃO

Assim como nas demais atividades industriais existentes no Brasil, as indústrias sucroalcooleira e do biodiesel possuem um elevado potencial poluidor em virtude dos efluentes gerados, merecendo gestões adequadas para os processos envolvendo resíduos líquidos.

A safra 2016/2017 de cana de açúcar é estimada em 684,77 milhões de toneladas de cana (CONAB, 2016). Considerando-se que, para a produção de etanol, é gerado volume residual de vinhoto na proporção de dez a quinze vezes superior em relação ao etanol produzido, pode-se afirmar que o tratamento deste efluente é de suma importância para a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro.

O glicerol é um composto orgânico pertencente a função álcool, estando presente em todos os óleos e gorduras de origem animal e vegetal. A produção de biodiesel através da reação de transesterificação de triglicerídeos com metanol ou etanol tem produzido nos últimos anos uma quantidade enorme de glicerol como subproduto (MELERO et al., 2012). Estimativas de produção sugerem que, volumetricamente, para cada 90 m<sup>3</sup> de óleo produzido, 10 m<sup>3</sup> de glicerol são gerados. A produção de biodiesel no Brasil possui previsão de produção de 45 milhões de m<sup>3</sup> para o ano de 2035, representando uma produção média de 5 milhões de m<sup>3</sup> de glicerol. A produção mundial de biodiesel para o mesmo ano está estimada ao redor de 100 milhões de m<sup>3</sup> (11,11 milhões de m<sup>3</sup> de glicerol), ou seja, o Brasil irá produzir em torno de 45% do total da produção (BiodieselBR, 2016).

Existem muitas aplicações ou usos do glicerol, que vão desde a produção de outros compostos químicos à incineração como alternativas de redução dos estoques (ZHOU et al., 2008). Uma das alternativas ocorre através do uso do glicerol em processos anaeróbios visando a produção de metano. A DQO do glicerol pode atingir valores de 1.000.000 g O<sub>2</sub>.m<sup>-1</sup>

<sup>3</sup>, o que demonstra a importância de adicioná-lo a efluentes ricos em nutrientes para aumentar o potencial de produção de metano por processos anaeróbios.

Panpong et al. (2014), através de experimento com processo de co-digestão anaeróbia, investigaram a possibilidade da produção de biogás a partir de efluentes da produção de enlatados de frutos de mar com dosagens de glicerol, com diferentes graduações. A proporção ótima para a produção de metano verificada neste experimento foi de 1% de glicerol, pela qual foi verificado aumento de 108% do volume de metano, em comparação ao efluente de enlatados de frutos do mar puro.

Segundo Zanette (2009), os resíduos agropecuários no Brasil resultariam em um potencial de produção de metano de 66,3 milhões de  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  e os efluentes industriais em potencial de 12,7 milhões de  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .

Este artigo tem como objetivo discutir os resultados de produção de metano com efluente de processo de produção de biohidrogênio via anaeróbia utilizando misturas de vinhoto residual e glicerol.

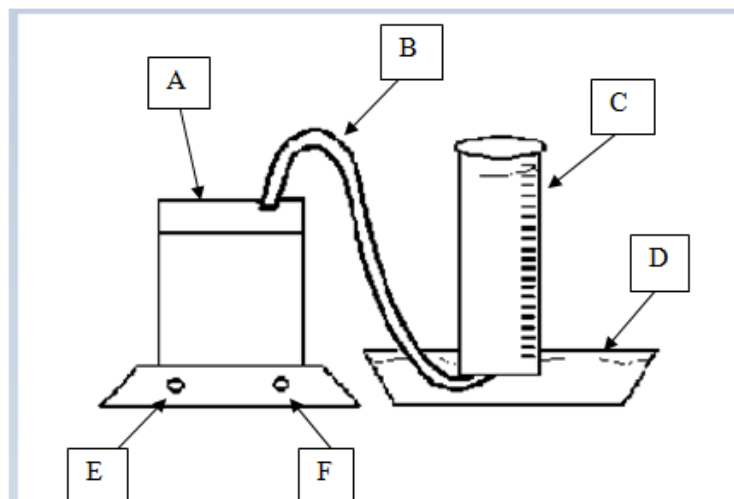
## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O experimento foi instalado na unidade laboratorial pertencente ao LATAM (Laboratório de Tecnologias Ambientais), da Universidade de Caxias do Sul.

Os substratos utilizados para os estudos de produção de metano foram vinhoto e glicerol previamente tratados anaerobiamente para obtenção de hidrogênio. Após o processo de obtenção de hidrogênio, a fração líquida residual foi filtrada para retenção da biomassa produtora de hidrogênio e então submetida ao tratamento com biomassa anaeróbia, em reatores de mistura completa operando em batelada, para obtenção de metano.

### **Unidade experimental**

Os experimentos foram realizados em reatores, conforme Figura 1 e 2, os quais possuíam um volume total de 3,2 L, sendo o volume útil de 2,5 L. Os reatores foram confeccionados em acrílico.



- A = reator utilizado nos experimentos avaliados  
 B = mangueira para passagem do biogás produzido  
 C = proveta invertida para medição do biogás produzido  
 D = recipiente com água pH 12  
 E = controle do agitador magnético  
 F = controle da temperatura

Figura 1: Esquema da unidade experimental.

Fonte: Autor (2016)

Para garantir a completa mistura dentro do reator, foram utilizados agitadores magnéticos com placa de aquecimento, garantindo aos reatores a temperatura de  $37 \pm 2$  °C. Os reatores foram vedados em todas as suas extremidades com silicone, evitando perda de gás. A estanqueidade foi testada em teste de imersão em água com injeção de ar. O biogás produzido foi medido por deslocamento de líquido, em uma proveta invertida externa ao reator. O líquido utilizado no sistema foi água com pH 12, para proporcionar a solubilização do gás carbônico e permitir somente o deslocamento do líquido pelo gás metano. Para cada leitura de produção de metano, foi realizada a leitura da temperatura da água e, após, o volume foi normalizado para 20 °C.

### Substrato

O substrato utilizado nos oito experimentos efluente de processo de produção de biohidrogênio via anaeróbia utilizando misturas de vinhoto residual e glicerol em diferentes proporções, as quais foram: 80/20, 60/40 e 20/80. O pH do processo acidogênico foi de 5,75, 6,0, 6,0, 5,75, 5,75, 6,0, 6,0 e 5,75, para os experimentos VG1, VG2, VG3, VG4, VG5, VG6, VG7 e VG8, respectivamente.

## Avaliação de produção de metano

As condições operacionais testadas foram baseadas na caracterização do substrato em cada um dos oito experimentos avaliados, considerando as composições de vinhoto e glicerol utilizadas para produção de biohidrogênio. Os testes de biodegradabilidade anaeróbia foram baseados na metodologia proposta por Monteggia (1991) para os ensaios de Atividade Metanogênica. A concentração de SVT para todos os ensaios foi de 5.000 mg.L<sup>-1</sup>. Os microrganismos não passaram por nenhum processo de inativação nesta etapa.

Tabela 1: Composição do substrato dos experimentos e DQO inicial.

Experimento	Composição do substrato (V/G)	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
VG1	80/20	17.142
VG2	60/40	18.522
VG3	60/40	16.764
VG4	80/20	15.888
VG5	80/20	16.380
VG6	20/80	16.052
VG7	60/40	21.035
VG8	80/20	11.633

Fonte: Autor, 2016.

As tabelas a seguir apresentam informações sobre as condições de preparo e componentes dos oito experimentos (VG1, VG2, VG3, VG4, VG5, VG6, VG7 e VG8) conduzidos neste estudo.

Tabela 2: Dados relativos ao experimento VG1

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	17.142
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	17.142
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	17.142

Tabela 3: Dados relativos ao experimento VG2

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	18.522
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	18.522
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	18.522

Tabela 4: Dados relativos ao experimento VG3

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.764
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.764

3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	16.764
---	----------	-----------	-----------	--------

Tabela 5: Dados relativos ao experimento VG4

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	15.888
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	15.888
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	15.888

Tabela 6: Dados relativos ao experimento VG5

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.380
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.380
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	16.380

Tabela 7: Dados relativos ao experimento VG6

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	16.052
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	16.052

Tabela 8: Dados relativos ao experimento VG7

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	21.035
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	21.035
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	21.035

Tabela 9: Dados relativos ao experimento VG8

REATOR	SVT (mg.L <sup>-1</sup> )	mSVT (mg)	mDQO (mg O <sub>2</sub> )	DQO (mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )
1	5.000,00	12.500,00	6.250,00	11.633
2	5.000,00	12.500,00	12.500,00	11.633
3	5.000,00	12.500,00	18.750,00	11.633

Fonte: Autor, 2016.

### Avaliação da produção de metano

Foi utilizado o método da tangente (BEAL, 2004). Este método consiste nos seguintes passos básicos:

- construção de gráficos de volume acumulado de metano versus tempo;



- modelação da curva obtida, usando uma função matemática onde o volume acumulado de metano varia em função do tempo, o qual pode ser definido como  $y = f(x)$ ;
- derivação da função obtida,  $y' = f'(x)$ , avaliada no período de tempo do experimento, obtendo assim a taxa máxima de produção de metano o que equivale a:

$$y' = \left( \frac{dvCH_4}{dt} \right)$$

Com o valor obtido, dividido pela quantidade mássica de biomassa, é possível obter a taxa específica de produção de metano.

Para a apresentação dos dados relativos a produção de metano, foi utilizado o Origin Pro versão 8.1, software de gráfico para análise de dados e estatística desenvolvido pela Originlab.

### Análises físicas e químicas

Foram efetuadas análises de ácidos graxos voláteis, composição do biogás gerado, de pH, de sólidos suspensos voláteis e sólidos suspensos totais. As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Ambiental (LATAM) e as técnicas utilizadas obedeceram aos procedimentos estabelecidos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), conforme Tabela 10.

Tabela 10: Métodos analíticos utilizados.

Análise	Método (APHA)	Ano
DQO	5220C 22nd Edition	2012
SólidosSuspensosTotais	2540D 22nd Edition	2012
SólidosSuspensosVoláteis	2540D 22nd Edition	2012
pH	2320C 22nd Edition	2012

Fonte: Autor (2016)

### Análise da composição de gases

As amostras de gás retiradas diretamente do reator, através do septo de borracha instalado, com seringa de 100 µl com trava, foram analisadas por cromatografia gasosa. O cromatógrafo utilizado foi modelo Dani Master AS, com coluna Carboxen™ 1006 PLOT Capillary Column (30mx0,53mm), com detector de condutividade térmica (TCD – Thermal Conductivity Detector), tendo gás Nitrogênio ultra puro como gás de arraste.

As condições operacionais para análise de gases são as seguintes: volume de injeção de 100  $\mu\text{L}$ ; temperatura do injetor de 100  $^{\circ}\text{C}$ ; fluxo da coluna de 5,5  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  e temperatura da coluna de 40 $^{\circ}\text{C}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados estratificados, de acordo com cada análise realizada.

### Produção de metano

Foram conduzidos oito experimentos utilizando-se vinhoto e glicerol como substrato, sendo que em cada experimento foram monitorados três reatores operando em batelada, com diferentes relações de A/M cujos resultados estão apresentados na Tabela 11.

Os maiores níveis de produção de metano ocorreram nos reatores com concentração inicial de DQO 5.000  $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$  e de 7.500  $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ , o que denota forte influência de concentrações mais elevadas de vinhoto e glicerol sobre a produtividade do biogás neste estudo. Destaque para a produção de metano do reator 3 do experimento VG8, reator 3 do experimento VG2 e reator 3 do experimento VG4. Importante enfatizar que todos estes reatores operaram com concentração inicial de DQO de 7.500  $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ , com maior concentração de vinhoto na mistura original. Quanto à influência das proporções de vinhoto e glicerol na produtividade de metano, foi observado que as melhores proporções foram para uma concentração inicial de DQO de 7.500  $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ , o que é esperado, porém esse comportamento não refletiu na velocidade específica de produção de metano.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados da velocidade específica de produção de metano para cada um dos reatores avaliados nos oito experimentos. Os maiores valores de atividade metanogênica, em todos os experimentos, foram verificadas nas concentrações iniciais de DQO 5.000  $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$  e de 7.500  $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ , promovendo maior velocidade específica na produção de metano no início da operação dos reatores.

Tabela 11: Produções de metano observadas nos experimentos, considerando concentração inicial de DQO

Experimento	Relação vinhoto/glicerol (%)	Reator	So (mg O <sub>2</sub> /L)	Sf (mg O <sub>2</sub> /L)	Vol. CH <sub>4</sub> (mL)	dv/dt (mL.h <sup>-1</sup> )	Velocidade específica (mmol CH <sub>4</sub> .gSVT <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )
VG1	80/20	1	2.500	1.045	2.444	207,848	0,742
		2	5.000	1.767	4.612	287,315	1,026
		3	7.500	3.785	5.909	296,620	1,059

<b>VG4</b>	80/20	1	2.500	1.987	2.575	164,261	0,598
		2	5.000	3.213	4.634	233,267	0,905
		3	7.500	2.730	6.993	232,118	0,886
<b>VG5</b>	80/20	1	2.500	1.436	2.445	82,961	0,491
		2	5.000	866	4.116	132,093	0,692
		3	7.500	3.435	4.095	112,587	0,666
<b>VG8</b>	80/20	1	2.500	1.223	3.647	167,599	0,536
		2	5.000	2.221	4.671	253,436	1,154
		3	7.500	1.554	8.687	248,209	1,153
<b>VG2</b>	60/40	1	2.500	1.011	3.232	137,485	0,587
		2	5.000	2.173	6.049	193,866	0,833
		3	7.500	2.094	7.990	186,546	0,829
<b>VG3</b>	60/40	1	2.500	944	3.247	112,240	0,296
		2	5.000	1.800	3.977	179,753	0,472
		3	7.500	7.120	2.104	136,239	0,402
<b>VG7</b>	60/40	1	2.500	1.453	2.646	91,225	0,326
		2	5.000	2.543	3.987	189,895	0,678
		3	7.500	1.987	5.245	306,788	1,096
<b>VG6</b>	20/80	1	2.500	1.346	3.863	150,212	0,401
		2	5.000	3.434	6.072	323,119	0,642
		3	7.500	987	6.640	427,527	0,486

Fonte: Autor (2016)

Em termos de cinética de produção de metano, os resultados dos oito experimentos demonstraram tendência de elevadas produções de metano nas primeiras horas de monitoramento, geralmente atingindo níveis elevados de produção de metano nas dez horas iniciais de operação dos reatores, para posteriormente a produção de metano ocorrer a uma taxa menor. Provavelmente, isto se explica pelo fato de ter havido significativo volume de compostos facilmente biodegradáveis presentes, proporcionando altas taxas de produção de metano no início dos experimentos, conforme pode ser visualizado nas Figuras 2.1 a 9.3.

Com relação aos resultados do experimento VG1, conforme demonstram as figuras 2.1, 2.2 e 2.3, o reator 1 apresentou produção de metano na faixa de 1.785 mL nas primeiras dez horas de operação, correspondendo a 73% do volume total de metano produzido em sessenta e três horas. Logo nas primeiras dez horas de experimento, o reator 2 produziu cerca de 2.500 mL de metano, conversão metanogênica que equivale a 54,3% do total produzido pelo reator em quarenta e sete horas de monitoramento. O reator 3 apresentou comportamento similar ao dos reatores 1 e 2, onde 2.605 mL de metano foram produzidos nas primeiras dez horas de operação, equivalente a 44% do total de metano produzido ao longo do tempo.

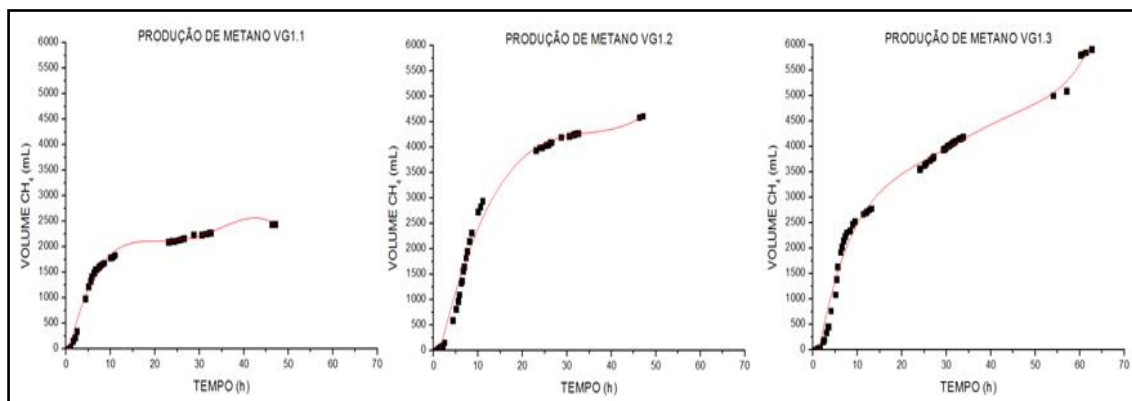


Figura 2.1 – Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 1, experimento VG1. Eq.  $y = -0,005x^4 + 0,617x^3 - 23,96x^2 + 396,0x - 277,5$ ;  $R^2 = 0,984$

Figura 2.2 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 2, experimento VG1. Eq.  $y = 0,105x^3 - 11,01x^2 + 393,8x - 536,1$ ;  $R^2 = 0,983$

Figura 2.3 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 3, experimento VG1. Eq.  $y = 7E-05x^5 - 0,012x^4 + 0,853x^3 - 28,80x^2 + 528,7x - 654,6$ ;  $R^2 = 0,985$

Fonte: Autor (2016)

De forma geral, o experimento VG2 apresentou comportamento similar ao do experimento V1, com exceção do reator 3, que apresentou incrementos gradativos mais sutis de volume de metano nas primeiras dez horas de operação. Contudo, o reator 3 produziu 2.097 mL de metano neste período inicial.

Isto denota que, mesmo com escala menor de produção de metano nas primeiras dez horas de experimento, o reator 3 também apresentou significativa produção no período. Os reatores 1 e 2 registraram produções significativas de metano nas primeiras dez horas de operação, representando, 46,9% e 38,8% do total produzido pelos reatores ao longo dos monitoramentos, respectivamente.

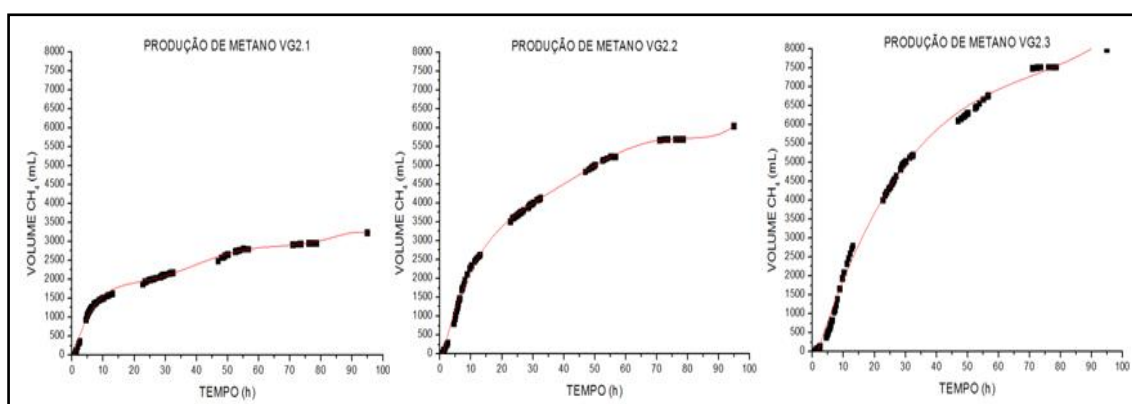


Figura 3.1 – Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 1, experimento VG2. Eq.  $y = -3E-07x^6 + 9E-05x^5 - 0,011x^4 + 0,666x^3 - 20,29x^2 + 317,0x - 143,9$ ;  $R^2 = 0,995$

Figura 3.2 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 2, experimento VG2. Eq.  $y = 1E-05x^5 - 0,002x^4 + 0,284x^3 - 13,51x^2 + 362,4x - 321,7$ ;  $R^2 = 0,998$

Figura 3.3 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 3, experimento VG2. Eq.  $y = 0,015x^3 - 3,242x^2 + 262,1x - 417,6$ ;  $R^2 = 0,995$

Fonte: Autor (2016)

Os resultados do experimento VG3 também apresentaram reatores com comportamento de significativos incrementos de metano nas primeiras horas de

monitoramento, com destaque para o reator 3, que produziu mais de 50% do volume total do reator em somente dez horas de operação.

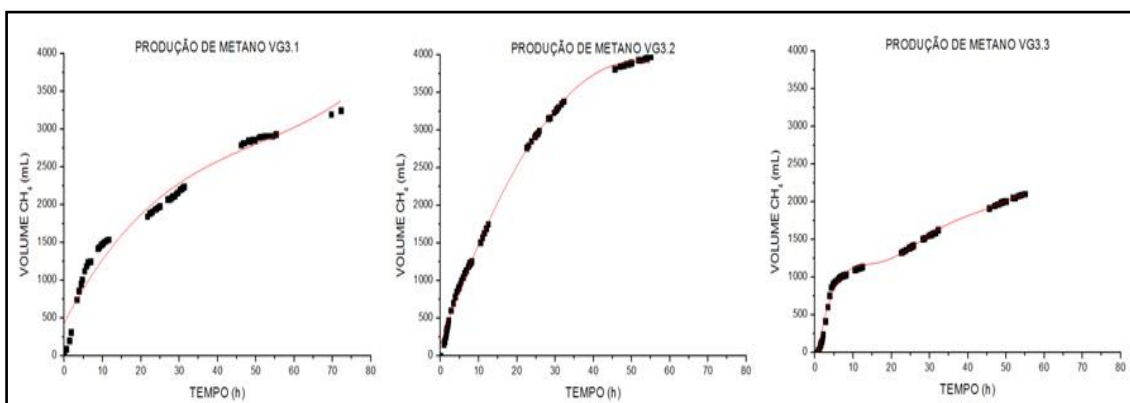


Figura 4.1 – Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 1, experimento VG3. Eq.  $y = 0,009x^3 - 1,495x^2 + 97,45x + 440,6$  ;  $R^2 = 0,961$

Figura 4.2 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 2, experimento VG3. Eq.  $y = -3,230x^2 + 185,5x$  ;  $R^2 = 0,998$

Figura 4.3 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 3, experimento VG3. Eq.  $y = -3E-06x^6 + 0,000x^5 - 0,050x^4 + 1,941x^3 - 38,07x^2 + 370,3x - 271,5$  ;  $R^2 = 0,991$

Fonte: Autor (2016)

Quanto aos resultados dos três reatores do experimento VG4, conforme ilustram as figuras 5.1, 5.2 e 5.3, pode-se afirmar que em todos os reatores houve significativo volume de produção de metano nas primeiras dez horas de operação. Destaque para o reator 1, o qual produziu 1.509 mL de metano no período, correspondente a 58,6% do montante produzido por este reator durante todo o tempo de monitoramento da sua operação, que foi de aproximadamente cinquenta e cinco horas.

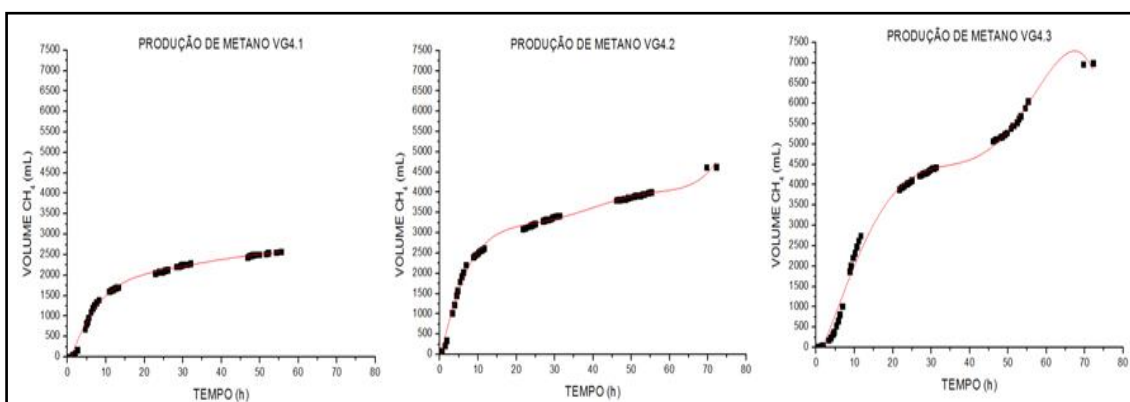


Figura 5.1 – Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 1, experimento VG4. Eq.  $y = 3E-05x^5 - 0,005x^4 + 0,416x^3 - 15,22x^2 + 292,1x - 260,7$  ;  $R^2 = 0,99$

Figura 5.2 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 2, experimento VG4. Eq.  $y = 5E-05x^5 - 0,009x^4 + 0,734x^3 - 26,51x^2 + 471,2x - 167,6$  ;  $R^2 = 0,995$

Figura 5.3 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 3, experimento VG4. Eq.  $y = -8E-05x^5 + 0,012x^4 - 0,627x^3 + 8,002x^2 + 209,3x - 367,7$  ;  $R^2 = 0,991$

Fonte: Autor (2016)

Os resultados dos três reatores do experimento VG5 apresentaram-se similares aos experimentos anteriores. Já o experimento VG6, apresentou níveis inferiores aos demais experimentos quanto a produção de metano nas dez primeiras horas de operação. Como exemplo, o reator 3 demonstrou produção de 643 mL de metano no período, equivalente a apenas 9,7% do volume total produzido no experimento.

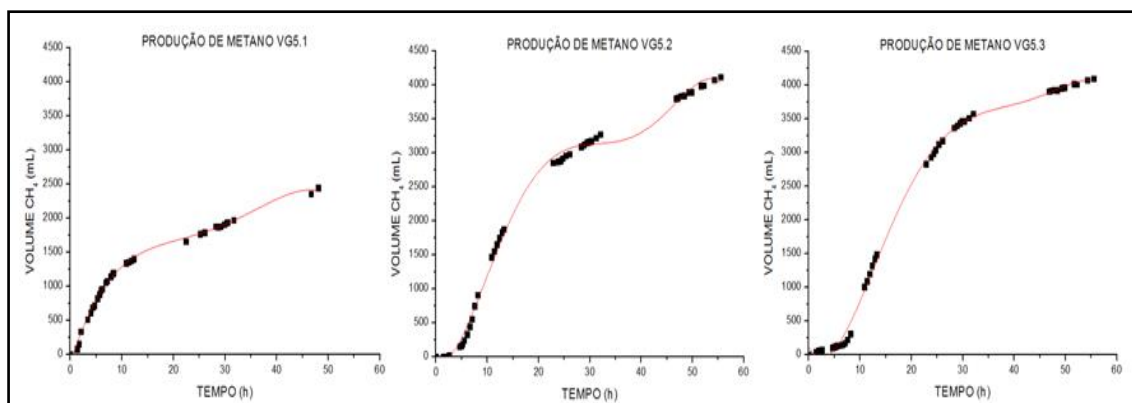


Figura 6.1 – Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 1, experimento VG5. Eq.  $y = -0,002x^4 + 0,319x^3 - 12,85x^2 + 240,9x - 126,1$ ;  $R^2 = 0,996$

Figura 6.2 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 2, experimento VG5. Eq.  $y = -0,000x^5 + 0,03x^4 - 1,521x^3 + 29,01x^2 - 39,59x - 71,03$ ;  $R^2 = 0,996$

Figura 6.3 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 3, experimento VG5. Eq.  $y = -0,000x^5 + 0,021x^4 - 1,284x^3 + 30,58x^2 - 128,9x + 108,9$ ;  $R^2 = 0,998$

Fonte: Autor (2016)

O experimento VG6 apresentou composição de proporção do substrato vinhoto e glicerol na ordem de 20/80, ou seja, representa o único experimento com fração de vinhoto inferior a fração de glicerol. Este aumento de concentração de glicerol no substrato possivelmente seja responsável pela elevação do tempo necessário para a conversão da matéria orgânica em metano, pela diminuição do volume de compostos facilmente biodegradáveis no substrato. Desta forma, os níveis de produção de metano nos três reatores do experimento VG6 apresentaram comportamento linear, com gradativos incrementos de metano produzido ao longo do tempo.

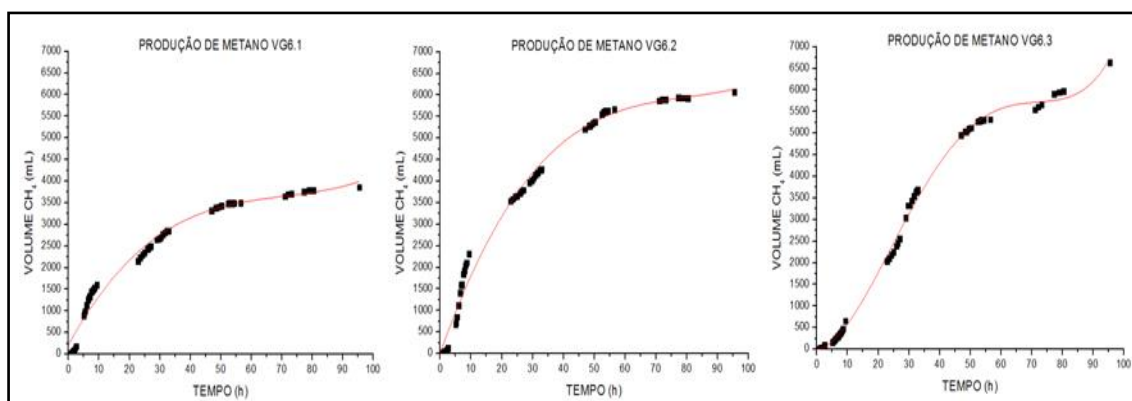


Figura 7.1 – Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 1, experimento VG6. Eq.  $y = 0,008x^3 - 1,688x^2 + 127,9x + 224,2$ ;  $R^2 = 0,975$

Figura 7.2 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 2, experimento VG6. Eq.  $y = 0,01x^3 - 2,395x^2 + 202,1x + 16,16$ ;  $R^2 = 0,987$

Figura 7.3 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 3, experimento VG6. Eq.  $y = 0,000x^4 - 0,111x^3 + 5,984x^2 + 9,381x - 4,869$ ;  $R^2 = 0,997$

Fonte: Autor (2016)

Os experimentos VG7 e VG8 apresentaram produtividade alta de metano nas primeiras dez horas de operação dos reatores, com comportamentos similares a maioria dos experimentos testados neste estudo. As Figuras 8.1, 8.2, 8.3, 9.1, 9.2 e 9.3 apresentam os respectivos resultados.

Panpong et al. (2014), verificaram a produção de cerca de 5.000 mL de metano em experimento utilizando-se efluentes da produção de enlatados de frutos do mar, com diferentes concentrações de glicerol, com tempo de detenção hidráulica de 64 dias.

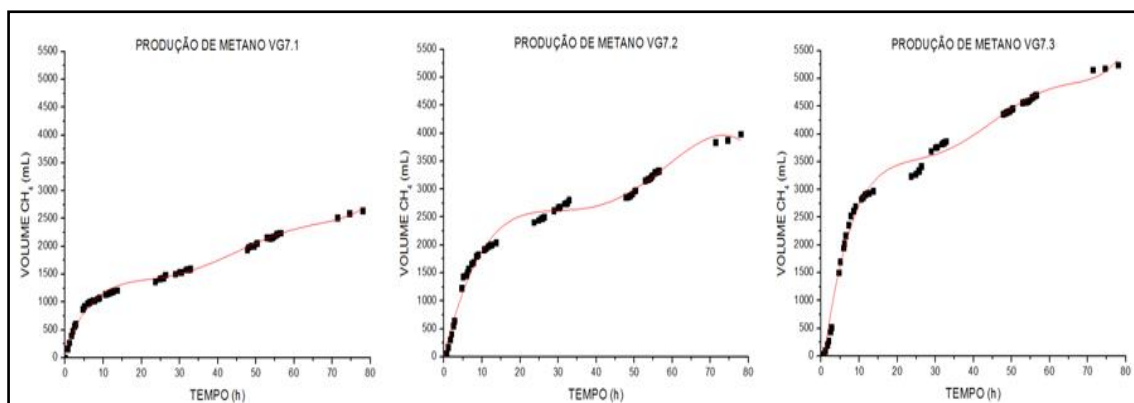


Figura 8.1 – Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 1, experimento VG7. Eq.  $y = 2E-05x^5 - 0,003x^4 + 0,290x^3 - 10,48x^2 + 182,5x + 131,3$ ;  $R^2 = 0,994$

Figura 8.2 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 2, experimento VG7. Eq.  $y = -0,001x^4 + 0,189x^3 - 11,30x^2 + 284,3x + 4,304$ ;  $R^2 = 0,988$

Figura 8.3 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 3, experimento VG7. Eq.  $y = 4E-05x^5 - 0,008x^4 + 0,730x^3 - 28,33x^2 + 528,9x - 387,2$ ;  $R^2 = 0,99$

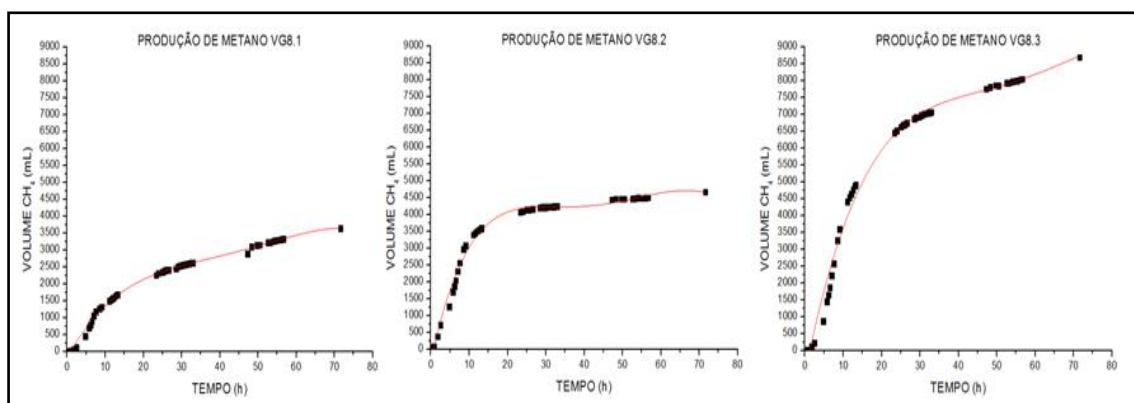


Figura 9.1 – Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 1, experimento VG8. Eq.  $y = -0,000x^4 + 0,094x^3 - 6,237x^2 + 206,3x - 174,5$ ;  $R^2 = 0,996$

Figura 9.2 -Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 2, experimento VG8. Eq.  $y = 1E-05x^5 - 0,003x^4 + 0,434x^3 - 21,98x^2 + 514,0x - 310,4$ ;  $R^2 = 0,99$

Figura 9.3 - Produção de metano ao longo do tempo pelo reator 3, experimento VG8. Eq.  $y = -0,000x^4 + 0,184x^3 - 15,15x^2 + 567,0x - 690,8$ ;  $R^2 = 0,988$

Fonte: Autor (2016)

Equivalentemente, o presente estudo utilizando composto de vinhoto com glicerol, necessitou de tempo de detenção hidráulica aproximado de 3 dias para uma produção média de 4.571 mL de metano, demonstrando maior potencial de produção de biogás com tais efluentes industriais.

De uma forma geral os resultados obtidos confirmam a afirmação de Backes (2011), de que o uso do glicerol bruto foi reconhecido com potencial energético para ser usado na suplementação da digestão anaeróbia com dejetos orgânicos.

## **CONCLUSÕES**

Os resultados apresentaram-se satisfatórios com relação aos principais objetivos propostos, no que tange a produção de metano através da conversão do vinhoto e glicerol em processo anaeróbio e pela redução de DQO dos efluentes das indústrias sucroalcooleira e do biodiesel, em níveis significativos.

A produção média de metano obtida nos oito experimentos aponta para uma viabilidade da utilização do vinhoto para fins de produção de biogás, por meio de processos anaeróbios.

Percebe-se influência positiva na produção de metano quanto à presença de glicerol nos compostos de efluentes tratados, a qual apresentou resultados significativos de produção de metano, mesmo sendo testado somente um experimento neste estudo. Os experimentos com melhores resultados foram aqueles que tiveram um processo de produção de hidrogênio com pH 6,0 (VG2 e VG4) e pH 5,75, (VG8).

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**BACKES, M. G. Avaliação do processo de digestão anaeróbica na geração de energia a partir de dejetos suínos e bovinos de leite com suplementação de glicerina residual bruta oriunda da produção de biodiesel.** Dissertação. UNIVATES. Lajeado, 2011.

**BEAL, L. L. Tratamento anaeróbio de efluente de curtume de acabamento associado a membranas de micro e ultrafiltração.** Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.



BiodieselBR: Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/i/biodiesel/biodiesel-brasil-producao.png>>. Acesso em: 04.12.2016.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Cana de Açúcar**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016.

MELERO, J. A.; VICENTE G.; PANIAGUA M.; MORALES G.; MUNOZ P. **Etherification of biodiesel-derived glycerol with ethanol for fuel formulation over sulfonic modified catalysts**. *Bioresour. Technol.*, 2012.

MONTEGGIA, L.O. **The use of specific methanogenic activity for controlling anaerobic reactors**. University of Newcastle Upon Tyne, 1991.

PANPONG K.; SRISUWAN G.; O-THONG S.; KONGJAN P. **Anaerobic Co-digestion of Canned Seafood Wastewater with Glycerol Waste for Enhanced Biogas Production**. *Energy Procedia*, n. 52, 2014.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético de biogás no Brasil**. Dissertação. UFRJ / COPPE / Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2009.

ZHOU C. H. C.; BELTRAMINI J. N.; FAN Y. X.; LU G. Q. M. **Chem. Soc. Rev.**, 2008.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentaram-se satisfatórios com relação a produção de metano através da conversão do vinhoto e glicerol como pós-tratamento de produção de hidrogênio. Os três reatores dos quatro experimentos que apresentaram resultados mais significativos em termos de produção de metano no período de tempo monitorado, utilizando somente vinhoto residual, foram o V4.3, V2.3 e o V3.3, em volumes de 6.241 mL, 6.087 mL e 4.845 mL, respectivamente. Já nos experimentos utilizando também glicerol, os resultados apresentaram produções máximas de metano de 8.687 mL, 7.990 mL e 6.640 mL, para relações de proporções de vinhoto e glicerol de 80/20, 60/40 e 20/80, respectivamente.

Os valores obtidos para todos os experimentos remetem a conclusão de que é possível e interessante, sob o ponto de vista de obtenção de biocombustíveis, associar um processo de produção de metano a um processo de produção de biohidrogênio.

Os resultados de experimentos testando compostos de vinhoto e glicerol igualmente atenderam os principais objetivos propostos, no que tange a produção de metano através da conversão do vinhoto e glicerol por atividade metanogênica em processo anaeróbio e pela redução de DQO dos efluentes das indústrias sucroalcooleira e do biodiesel, em níveis significativos.

Recomenda-se a continuidade de experimentos testando vinhoto e glicerol para produção de metano em futuros estudos, através de processos anaeróbios. Diferentes proporções de vinhoto e glicerol, como 90/10 e 95/5 são parâmetros que podem ser avaliados, bem como analisar o potencial de produção de metano com vinhoto e glicerol sem tratamento anterior por acidogênese para produção de biohidrogênio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, A. C.; JÚNIOR, J. L.; RESENDE, K. T. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos obtidos nas diferentes estações do ano.** Engenharia Agrícola de Jaboticabal, 2004.

ANDRADE J. M. F.; DINIZ K. M. **Impactos Ambientais da Agrodindústria da Cana-de Açúcar: Subsídios para a Gestão.** Monografia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> Acesso em 15.05.2016.

ANGONESE, A. R.; CAMPOS, A. T.; WELTER, R. A. **Potencial de redução de emissão de equivalente de carbono de uma unidade suinícola com biodigestor.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, 2007.

AQUINO S. F.& CHERNICHARO C. A. L. **Acúmulo de ácidos graxos voláteis em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle.** Engenharia Sanitária Ambiental, 2005.

ARAGÃO, P. O. R. **A economia política do açúcar e do álcool no Brasil.** 1993. Tese (concurso de professor titular da UFPB) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1993.

BACKES, M. G. **Avaliação do processo de digestão anaeróbica na geração de energia a partir de dejetos suínos e bovinos de leite com suplementação de glicerina residual bruta oriunda da produção de biodiesel.** Dissertação. UNIVATES. Lajeado, 2011.

BARROS, V. G; DUDA, R. M.; OLIVEIRA R. A. **Biomethane production from vinasse in upflow anaerobic sludge blanket reactors inoculated with granular sludge.** Brazilian Journal of Microbiology. São Paulo, 2015.

BEAL, L. L. **Tratamento anaeróbio de efluente de curtume de acabamento associado a membranas de micro e ultrafiltração.** Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

BELLER H. R.; ZHOU P.; JEWELL T.N.M.; GOH E.; KEASLING J. D. **Enhanced fatty acid production in engineered chemolitho autotrophic bacteria using reduced sulfur compounds as energy sources.** Metabolic Engineering Communications, 2016.

BRASIL – **Lei Federal nº 6.938, de 1981.**

BRASIL – **Resolução CONAMA nº 237, de 1997.**

BURKE, D. A. **Dairy waste anaerobic digestion handbook:** Options for recovering beneficial products from dairy manure. Environmental Energy Company. Olympia - WA, 2001.

CATTONY E. B. M.; RIBEIRO, R.; ZAIAT M.; FORESTI E.; VARESCHE M. B. A. **Remoção de etanol e benzeno em reator anaeróbio horizontal de leito fixo na presença de sulfato.** Engenharia Sanitária Ambiental, 2007.

COLDEBELLA A.; SOUZA S. N. M.; FERRI P.; KOLLING E. M. **Viabilidade da geração de energia elétrica através de um motor gerador utilizando biogás da suinocultura.** Informe Gepec, vol. 12, 2008.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Cana de Açúcar.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016.

COOPERBIO – Cooperativa Mista de Produção, Industrialização e Comercialização de Biocombustíveis do Brasil. Disponível em: <<http://www.cooperbio.coop.br/>>. Acesso em: 07.06.2015.

CREMONEZ, P.A.; ROSSI, E.; FEROLDI M.; TELEKEN J. G.; FEIDEN A.; DIETER J. **Codigestão de água residual de suinocultura e vinhaça sob diferentes condições térmicas.** Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal. Lisboa, 2014.

DIEESE – Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos. Disponível em: <[http://www.dieese.org.br/estudosepesquisas/2007/estpesq30\\_setorSucroalcooleiro.pdf](http://www.dieese.org.br/estudosepesquisas/2007/estpesq30_setorSucroalcooleiro.pdf)> Acesso em: 24.05.2015.

EMATER/RS – Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural. Mr. Alencar Rugeri, Acesso em 01.09.2016.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>> Acesso em: 07.06.2015.

FERGUSON, R. M. W.; COULON F.; VILLA R. **Organic loading rate: A promising microbial management tool in anaerobic digestion.** Water Research, 2016.

FERRAZ JÚNIOR A. D. N.; WENZEL J.; ETCHEBEHERE C.; ZAIAT M. **Efeito da carga orgânica de hidrogênio na produção de vinhoto de cana de açúcar em reações termofílicas acidogênicas em reatores de leite embalados.** International Journal of Hydrogen Energy, 2014.

FERRAZ, J. M. G.; PRADA, L. de S.; PAIXÃO, M. **Certificação socioambiental do setor sucroalcooleiro.** Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2000.

FIGUEIREDO, T. Q. **A Produção Sucroalcooleira e a Sustentabilidade: Um Diagnóstico do Início do Século XXI na Paraíba.** Revista Olhares Plurais – Revista Eletrônica Multidisciplinar, Vol. 1, Nº 2, Ano 2010.

GERARDI, M. H. **The microbiology of anaerobic digesters.** Nova Jersey, Wiley Interscience, 2003.

GIACHINI, 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.3, 2009.

GOTTSCHALK, G. **Bacterial fermentations**. In Bacterial Metabolism. Nova York, Springer Verlag, 1986.

GOUX X.; CALUSINSKA M.; FOSSÉPRÉ M.; BENIZRI E.; DELFOSSE P. **Start-up phase of an anaerobic full-scale farm reactor – Appearance of mesophilic anaerobic conditions and establishment of the methanogenic microbial community**. Bioresource Technology, 2016.

GRANATO, E. F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbia da vinhaça**. UNESP – Campus de Bauru. Dissertação de Mestrado, 2003.

HOUSAGUL S.; SIRISUKPOKA U.; BOONYAWANICH S.; PISUTPAISAL N. **Biomethane Production from Co-digestion of Banana Peel and Waste Glycerol**. Energy Procedia n. 61, 2014.

IEA – Instituto de Economia Agrícola. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=3390>> Acesso em: 07.06.2015.

JORDÃO, E. P; PESSOA, A. C. **Tratamento de esgotos domésticos, concepções clássicas de tratamento de esgotos, 2ª edição**. CETESB, São Paulo, 1995.

KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. **Energieaus Biomasse – Grundlagen Techniken und Verfahren**. Berlin / Heidelberg / Nova York. Spring Verlag, 2001.

KUS, F.; WIESMANN, U. **Degradation kinetics of acetate and propionate by immobilized anaerobic mixed cultures**. Water research . New York, 1995.

LETTINGA, G. HULSHOF POL L. W.; ZEEMAN G. **Biological wastewater treatment. Part I: Anaerobic waste water treatment.** Wageningen Agricultural University. Wageningen, 1996.

LIU C.; LI H.; ZHANG Y.; SI D.; CHEN Q. **Evolution of microbial community along with increasing solid concentration during high-solids anaerobic digestion of sewage sludge.** Bioresource Technology, 2016.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** Tese Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MELERO, J. A.; VICENTE G.; PANIAGUA M.; MORALES G.; MUNOZ P. **Etherification of biodiesel-derived glycerol with ethanol for fuel formulation over sulfonic modified catalysts.** Bioresour. Technol., 2012.

MENESES, B. **A produção de biogás com vinhaça, uma alternativa para contribuir com o desenvolvimento da Bioenergia.** Estudo de caso, Destilaria de Serviços Manufatureiros S.A. Sugar Journal, 2008.

MONTEGGIA, L.O. **The use of specific methanogenic activity for controlling anaerobic reactors.** University of Newcastle Upon Tyne, 1991.

PANPONG K.; SRISUWAN G.; O-THONG S.; KONGJAN P. **Anaerobic Co-digestion of Canned Seafood Wastewater with Glycerol Waste for Enhanced Biogas Production.** Energy Procedia, n. 52, 2014.

PARNAUDEAU, V.; CONDOM N.; OLIVER R.; CAZEVIEILLE P.; RECOUS S. **Vinasse organic matter quality and mineralization potencial, as influenced by raw material, fermentation and concentration processes.** BioresourTechnol., 2008.

PECORA, V.; VELAZQUÉZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia**

**elétrica:** Estudo de caso em São Paulo. In: Congresso Internacional de Bioenergia,6, 2009, Curitiba.

PINTO C. P. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável.** Dissertação. Universidade Estadual de Campinas, 1999.

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios.** Belo Horizonte, 2001.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Ethanol Industry Outlook,** 2006. Disponível em: <http://www.ethanolrfa.org/>.

RIO GRANDE DO SUL – **Lei Estadual nº 11.520, de 2000.**

RODRIGUES, J. P.; ORRICO, A. C. A.; JUNIOR, M. A. P. O.; SENO, L. O.; ARAÚJO, L. C.; SUNADA, N. S. **Adição de óleo e lipase sobre a biodigestão anaeróbia de dejetos suínos.** Ciência Rural, Santa Maria, 2014.

SAITO, J. R. **Análise das cadeias agroindustriais utilizando simulação computacional baseada na metodologia System Dynamics: um estudo de caso.** Dissertação. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

SALOMON K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.** Universidade Federal de Itajubá. Tese de Doutorado, 2007.

SANCHEZ, E.; BORJA, R.; TRAVIESO, L.; MARTIN A.; COLMENAREJO, M. F. **Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste.** Bioresource Technology, Oxford, 2005.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar - Bioenergia, açúcar e etanol - Tecnologias e perspectivas.**2.ed. Viçosa: UFV. 2011.



SANTANA & OLIVEIRA. **Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura.** Engenharia Agrícola de Jaboticabal, 2005.

SARTI A.; SILVA A. J.; CÔRTEZ R. S.; FORESTI E. **Remoção de sulfato de águas residuárias industriais em reator anaeróbio de leito fixo operado em bateladas seqüenciais.** Engenharia Sanitária Ambiental, 2008.

SARTI A.; ZAIAT M. **Anaerobic treatment of sulfate-rich wastewater in an anaerobic sequential batch reactor (AnSBR) using butanol as the carbon source.** Journal of Environmental Management, 2011.

SAWASDEE V.; PISUTPAISAL N. **Feasibility of Biogas Production from Napier Grass.** Energy Procedia, n. 61, 2014.

SCHOUCHANA, F.; WIDONSCK, C. A. **Formação do preço do açúcar e do álcool na BM&F.** Resenha BM&F, n. 145, 2001.

SILVA, M. A. S. da; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. **Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, 2007.

SOUBES M. **Microbiologia de la digestion anaerobia.** In: Anais III Taller y Seminario Latino americano: tratamiento anaerobio de aguas residuales. Montevideo, 1994.

STEINER, E.; SCOTT, J.; MINTOM, P. N.; WINZER, K. **Anagr quorum sensing system that regulates granulose formation and sporulation in Clostridium acetobutylicum.** Applied and Environmental Microbiology, 2011.

TELI A.; FICARA E.; MALPEI E. **Bio-hydrogen production from cheese whey by dark fermentation.** Chem.Eng.Trans, 2014.

UENO C. R. J.; COSTA A. C. S.; GIMENES M. L.; ZANIN G. M. **Agricultural recycling of biodigested vinasse for lettuce production.** Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 2014.

VAN HAADEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbico de esgotos: um manual para regiões de clima quente.** 1984.

VIEIRA, M. C. A. **Setor Sucroalcooleiro Brasileiro: Evolução e Perspectivas.** BNDES Publicações, 2007.

VIRMOND, E. **Aproveitamento do lodo tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia.** Dissertação. UFSC. Florianópolis, 2007.

WAACK, R. S.; NEVES, M. F.; MORAES, S.; MARINO, M. K.; MAMONE, A.; SZASZ, A. H. **Competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar.** São Paulo: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada/USP, 1998.

WEILAND, P. **Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany.** Applied Biochemistry and Biotechnology, 2003.

XIA YUN.; MASSÉ D. I.; McALLISTER T.A.; BEAULIEU C.; UNGERFELD E. **Anaerobic digestion of chicken feather with suine manure or slaughterhouse sludge for biogas production.** Waste Management, 2011.

YAMADA, M. C.; PORTO, A. J. V.; INAMASU. R. Y. **Aplicação dos conceitos de modelagem e de redes de Petri na análise do processo produtivo da indústria sucroalcooleira.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.37, n.6, 2002.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético de biogás no Brasil.** Dissertação. UFRJ / COPPE / Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2009.

ZHOU C. H. C.; BELTRAMINI J. N.; FAN Y. X.; LU G. Q. M. **Chem. Soc. Rev.**, 2008.

**ANEXOS – COMPROVANTES DE SUBMISSÃO DE ARTIGOS**

[ESA] Agradecimento pela Submissão - Mensagem (texto sem formatação)

Arquivo Mensagem Varredura de e-mail da McAfee

Ignorar Excluir Responder Responder a Todos Encaminhar Mais Reunião Mensagem Instantânea

Mover para? Para o Gerente Regras OneNote Concluído

Email de Equipe Responder e Excluir Criar Mover Ações

Etapas Rápidas

Marcar como Não Lida Categorizar Acompanhamento

Traduzir Localizar Relacionadas Selecionar Zoom

Edição

Foram removidas as quebras de linha extras desta mensagem.

De: Equipe Editorial <noreply.ojs@scielo.org> Enviada em: dom 11/12/2016 23:38

Para: Fabrício Hoeltz Steffens

Cc:

Assunto: [ESA] Agradecimento pela Submissão

Prezado(a) Fabrício Hoeltz Steffens,

Acusamos o recebimento da submissão do seu manuscrito "PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE VINHOTO COMO PÓS TRATAMENTO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO" para Engenharia Sanitária e Ambiental.

O sistema de avaliação é double blind review, onde não revela o nome do autor para o avaliador nem o nome do avaliador para o autor, adotado pelo Conselho Editorial para garantir a avaliação independente realizada por consultores ad hoc.

Os números anteriores da revista podem ser acessados pelo site:  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_serial&pid=1413-4152&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_serial&pid=1413-4152&lng=pt&nrm=iso)

Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:  
<http://submission.scielo.br/index.php/esa/author/submission/173330>

Login: fhs1903

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este e-mail. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Equipe Editorial  
Engenharia Sanitária e Ambiental

Equipe Editorial  
Engenharia Sanitária e Ambiental

Engenharia Sanitária e Ambiental

Mais informações sobre: Equipe Editorial.

09:37 12/12/2016

[ESA] Agradecimento pela Submissão - Mensagem (texto sem formatação)

Arquivo Mensagem Varredura de e-mail da McAfee

Ignorar Excluir Responder Responder a Todos Encaminhar Mais Reunião Mensagem Instantânea

Mover para? Para o Gerente Regras OneNote Concluído

Email de Equipe Responder e Excluir Criar Mover Ações

Etapas Rápidas

Marcar como Não Lida Categorizar Acompanhamento

Traduzir Localizar Relacionadas Selecionar Zoom

Edição

Foram removidas as quebras de linha extras desta mensagem.

De: Equipe Editorial <noreply.ojs@scielo.org> Enviada em: dom 11/12/2016 23:43

Para: Fabrício Hoeltz Steffens

Cc:

Assunto: [ESA] Agradecimento pela Submissão

Prezado(a) o Fabrício Hoeltz Steffens,

Acusamos o recebimento da submissão do seu manuscrito "PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE VINHOTO E GLICEROL" para Engenharia Sanitária e Ambiental.

O sistema de avaliação é double blind review, onde não revela o nome do autor para o avaliador nem o nome do avaliador para o autor, adotado pelo Conselho Editorial para garantir a avaliação independente realizada por consultores ad hoc.

Os números anteriores da revista podem ser acessados pelo site:  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_serial&pid=1413-4152&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_serial&pid=1413-4152&lng=pt&nrm=iso)

Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:  
<http://submission.scielo.br/index.php/esa/autor/submission/173331>

Login: fhs1903

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este e-mail. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Equipe Editorial  
Engenharia Sanitária e Ambiental

Equipe Editorial  
Engenharia Sanitária e Ambiental

Engenharia Sanitária e Ambiental

Mais informações sobre: Equipe Editorial.

09:38 12/12/2016



[CAPA](#) [SOBRE](#) [PÁGINA DO USUÁRIO](#) [NOTÍCIAS](#)

Capa > Usuário > Autor > **Submissões Ativas**

## Submissões Ativas

**ATIVO** [ARQUIVO](#)

ID	MM-DD ENVIADO	SEÇÃO	AUTORES	TÍTULO	SITUAÇÃO
173331	12-11	AT	Steffens	PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA...	Aguardando designação
173330	12-11	AT	Steffens	PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DE VINHOTO COMO PÓS...	Aguardando designação

1 a 2 de 2 itens

### Iniciar nova submissão

[CLIQUE AQUI](#) para iniciar os cinco passos do processo de submissão.

ABES

Av. Beira Mar, 216 - 13º Andar - Castelo  
20021-060 Rio de Janeiro - RJ - Brasil  
[esa@abes-dn.org.br](mailto:esa@abes-dn.org.br)

[OPEN JOURNAL SYSTEMS](#)

[Ajuda do sistema](#)

#### USUÁRIO

Logado como:

**fh1903**

- [Meus periódicos](#)
- [Perfil](#)
- [Sair do sistema](#)

#### AUTOR

Submissões

- [Ativo \(2\)](#)
- [Arquivo \(0\)](#)
- [Nova submissão](#)

#### IDIOMA

Selecione o idioma

Português (Brasil)

#### TAMANHO DE FONTE



#### NOTIFICAÇÕES

- [Visualizar](#)
- [Gerenciar](#)

#### PALAVRAS-CHAVE

[Aterro Sanitário](#) [Avaliação Ambiental](#)  
[Estratégia](#) [Biógás](#) [Compostagem](#) [Lixiviado](#)

#### Resíduos Sólidos

[abastecimento de água](#) [aterro sanitário](#)  
[bacia hidrográfica](#) [esgotamento sanitário](#)  
[fármacos](#) [gestão ambiental](#) [pós-](#)  
[tratamento](#) [qualidade da água](#)  
[reciclagem](#) [resíduos sólidos](#) [resíduos](#)  
[sólidos urbanos](#) [saneamento](#)  
[tratamento de esgoto](#) [tratamento de](#)  
[resíduos águas residuárias](#)