

Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Eduardo Augusto Fabiano de Sousa

Simulador do reator UASB para conversão de vinhaça em biogás

Uberaba

2014

Eduardo Augusto Fabiano de Sousa

Simulador do reator UASB para conversão de vinhaça em biogás

Monografia apresentada ao Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, área de concentração de Processos Industriais e Energia da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva

Uberaba

2014

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

S696s Sousa, Eduardo Augusto Fabiano de
 Simulador do reator UASB para conversão de vinhaça em biogás / Eduar-
do Augusto Fabiano de Sousa. -- 2014.
 42 f. : tab. ; graf. ; fig.

 Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) – Univer-
sidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2014.
 Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva.

 1. Biogás. 2. Reator UASB. 3. Cana-de-açúcar – Derivados. I. Silva,
Marcelo Bacci da. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 662.767.2

EDUARDO AUGUSTO FABIANO DE SOUSA

SIMULADOR DO REATOR UASB PARA CONVERSÃO DE VINHAÇA EM
BIOGÁS

Trabalho de conclusão apresentado ao
Programa de Mestrado Profissional em
Inovação Tecnológica da Universidade
Federal do Triângulo Mineiro, como requisito
para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 24 de junho de 2014

Banca Examinadora:

Marcelo Bacci da Silva

Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva
Orientador – PMPIT - UFTM

Luciano F. S. Rossi

Prof. Dr. Luciano Fernando dos Santos Rossi
Membro titular – UTFPR

Hugo Leonardo Pereira Rufino

Prof. Dr. Hugo Leonardo Pereira Rufino
Membro Titular – IFTM

Dedico a minha mãe, fonte de apoio, incentivo e motivação nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me abençoado. Agradeço ao meu orientador pelo comprometimento que teve comigo. A minha família, meus amigos e a todos que de alguma forma me ajudaram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Na produção de etanol, utilizando a cana-de-açúcar como matéria-prima, um dos subprodutos é a vinhaça, rica em nutrientes minerais e que apresenta elevado teor de matéria orgânica. Uma das alternativas exploradas para o aproveitamento deste subproduto é a produção de biogás (metano) por meio do processo de biodigestão anaeróbia em reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). De acordo com alguns pesquisadores, o biogás que é produzido pelo processo da biodigestão anaeróbia apresenta potencial energético competitivo com outras fontes energéticas. Um simulador capaz de fornecer resultados dessa produção pode representar uma ferramenta apropriada para análise de investimentos no setor energético, bem como fornecer informações para melhoria de processos produtivos de etanol. As equações de balanço de massa, implementadas no reator UASB, podem ser resolvidas com o objetivo de estabelecer o volume de gás produzido a partir de uma massa conhecida de vinhaça, além de permitir uma análise mais detalhada das propriedades físicas e químicas da vinhaça. Foi construído um simulador de fácil operação, com uma interface para o usuário que permite a inclusão de parâmetros do processo produtivo de etanol. Esses parâmetros consistem na vazão disponível do afluente de vinhaça, o valor de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio) e a temperatura desse efluente. O simulador pode ser de ajuda na análise dos parâmetros que interferem diretamente no volume de gás produzido.

ABSTRACT

In the production of ethanol from sugar cane as raw material, the vinasse is a sub product which is rich in mineral composites with high level of organic material substances. One of the alternatives used for the utilizing the sub products is the biogas (methane) production by upflow anaerobic sludge blanket (UASB). In accordance with some researches, the biogas produced has an energetical potential competitive with others energy sources. A simulator capable to produce results of this biogas production could represents an available tool for investments in the energy sector as well as to give informations to improve ethanol productive processes. The mass balance equations representing the UASB can be solved for establishing the gas volume produced from a certain vinasse mass, as well as to permit a detailed analyze of the physical and chemical vinasse properties. These properties consist of the available flow of the effluent of vinasse, the value of BOD (Biochemical Oxygen Demand) and COD (Chemical Oxygen Demand) and the temperature of the effluent. It is holped to make an easily simulated having an interface for the user and which permits the including of parameters for the productive process of ethanol.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas do processamento da cana-de-açúcar.....	13
Figura 2 – Etapas do tratamento do caldo da cana-de-açúcar.....	13
Figura 3 – Tanque de vinhaça.....	14
Figura 4 – Etapas da fermentação anaeróbica para produção de Metano.....	19
Figura 5 – Reator de manta de lodo em construção	20
Figura 6 – Desenho esquemático de um reator UASB.....	21
Figura 7 – Etapas da Produção e Utilização do Biogás	23
Figura 8 – Interfaces do Simulador	26
Figura 9 – Etapas da simulação	27
Figura 10 – Simulação da produção biogás a partir de vinhaça com vazão 530 m ³ /d	35
Figura 11 – Simulação da produção de biogás a partir de vinhaça com vazão 1909 m ³ /d.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de vinhaça conforme o tipo de mosto	17
Tabela 2 – Tempos de retenção hidráulica em reatores UASB.....	28
Tabela 3 – Velocidade de acordo com a vazão.....	30
Tabela 4 – Análise estatística da produção de biogás	33
Tabela 5 – Simulação da produção de biogás com TDH de 7 horas	34
Tabela 6 – Simulação da produção de biogás a partir de vinhaça com vazão 530 m ³ /d.....	35
Tabela 7 – Simulação da produção de biogás a partir de vinhaça com vazão 1909 m ³ /d.....	36
Tabela 8 – Valores de máximo e mínimo das variáveis	37
Tabela 9 – Análise estatística da produção de biogás	38

LISTA DE SIGLAS

ANNEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
COV	–	Carga Orgânica Volumétrica
DBO	–	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ETEs	–	Estação de Tratamento de Esgotos
EXP	–	Experimento
IDE	–	<i>Integrated Development Environment</i>
Q	–	Vazão
TDH	–	Tempo de Retenção Hidráulica
UASB	–	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanked</i>
UNESP	–	Universidade Estadual Paulista
UNICA	–	União da Indústria de Cana-de-açúcar
V	–	Volume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR	12
3.2 VINHAÇA	14
3.3 DIGESTÃO ANAERÓBICA	18
3.4 REATOR UASB.....	20
3.5 BIOGÁS.....	22
4 JUSTIFICATIVA	24
5 METODOLOGIA	25
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
7 CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a reportagem de Amato (2014), o cenário de escassez de recursos hidráulicos e de recursos térmicos coloca as usinas hidrelétricas do país numa situação delicada. Os reservatórios das regiões Sudeste e Centro-Oeste são responsáveis por cerca de 70% da energia hidrelétrica gerada no país. Os níveis dos reservatórios estão abaixo dos níveis dos reservatórios no ano de 2001, quando, devido à crise de apagão, o governo instituiu o plano de racionamento de energia.

O racionamento de energia é um dos reflexos da crise financeira que afeta diversos países. De acordo com Lucon e Goldemberg (2009), isso representa uma oportunidade para reorganizar o sistema energético usando como base a eficiência, a maior participação das fontes renováveis e a descentralização da produção de energia. Neste contexto, uma das alternativas para a crise energética seria a produção de energia por meio da cogeração em indústrias. Para Granato (2003), a indústria da cana-de-açúcar pode contribuir para a produção de energia elétrica.

O cultivo da cana-de-açúcar foi introduzido no Brasil em 1532, quando foi construído o primeiro engenho brasileiro. O ciclo da cana foi a primeira atividade econômica organizada no país. Atualmente, o Brasil é tido como uma potência sucroalcooleira global, sendo responsável por 25% da produção mundial de açúcar e por 20% da produção mundial de etanol. Segundo dados da União da Indústria de Cana-de-açúcar (2014), a safra de 2012/2013 foi de 588.478 mil toneladas de cana-de-açúcar. Foram produzidos mais de 23 milhões de m³ de etanol. As usinas sucroalcooleiras são autossuficientes em relação à energia elétrica, pois aproveitam o bagaço, que é gerado no processo de moagem da cana, para a geração de energia elétrica. Existe ainda o potencial para aproveitamento da vinhaça para geração de biogás.

A vinhaça é um subproduto derivado da produção do etanol. Além de ser rica em nutrientes, possui potencial para geração de biogás devido ao seu alto teor de matéria orgânica. Segundo Lindemeyer (2008), a geração de energia elétrica a partir do biogás mostrou-se econômica e financeiramente viável em estudos realizados em criadouros de suínos de Santa Catarina. O biogás pode ser produzido a partir da vinhaça de cana-de-açúcar por meio da digestão anaeróbica em um reator do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).

O reator UASB, também conhecido por reator de manta de lodo, foi desenvolvido na Holanda, na década de 70, para o tratamento de esgotos concentrados. Posteriormente, esse reator também foi utilizado em esgotos de baixa concentração. Sua implantação não demandava equipamentos sofisticados ou meios de suporte para retenção da biomassa. De acordo com Chernicharo (1997), o Brasil e outros países de clima tropical já utilizam os reatores de manta de lodo para o tratamento de esgotos domésticos. As experiências bem sucedidas nesses países indicam o potencial dos reatores de manta de lodo para o tratamento de águas residuárias. Conforme Santana e Oliveira (2005), os reatores de manta de lodo podem acomodar altas cargas orgânicas volumétricas, com tempo de retenção hidráulica curto.

A quantidade de biogás a ser produzido está relacionada às características da vinhaça e das configurações do reator de manta de lodo. As características da vinhaça variam de acordo com o tipo de mosto e outros fatores.

Neste estudo, é desenvolvido um software para simulação do processo realizado no reator UASB na geração de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar, que possibilitará a geração de resultados hipotéticos a partir dos valores informados sobre as características da vinhaça. O software desenvolvido poderá ser usado para calcular a viabilidade econômica da produção do biogás para geração de energia elétrica. Os resultados simulados poderão ser usados na construção do modelo concreto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Simular, por meio de um software, a produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbica da vinhaça em reator tipo USAB, para a produção de energia elétrica a partir da queima do biogás.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Demonstrar o potencial da geração de biogás para a geração de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça.
- Fornecer informações para a tomada de decisões quanto à instalação e à viabilidade econômica da produção de energia elétrica a partir da vinhaça.
- Analisar a influência de parâmetros da biodigestão no volume de gás produzido.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

O processo de produção da cana-de-açúcar se inicia com o controle e planejamento dos canaviais, sendo montado um programa de corte baseado na maturação da cana. Depois de cortada, a cana é transportada do campo para a unidade industrial.

De acordo com Payne (1989), na recepção da cana, ela é pesada, em seguida é retirada uma amostra para verificação do teor de açúcar. Após a verificação, a cana é lavada nas mesas alimentadoras para retirada da terra proveniente da lavoura. Feita a lavagem, a cana passa por picadores que trituram os colmos¹, preparando-a para a moagem.

Na moagem, é originado o bagaço, que é utilizado para geração de calor nas caldeiras. O vapor produzido nas caldeiras movimenta turbinas para a geração de energia elétrica. Na figura 1 são apresentadas as etapas do processamento da cana-de-açúcar até a extração do caldo (os itens 1 e 2 são apresentados na figura 2).

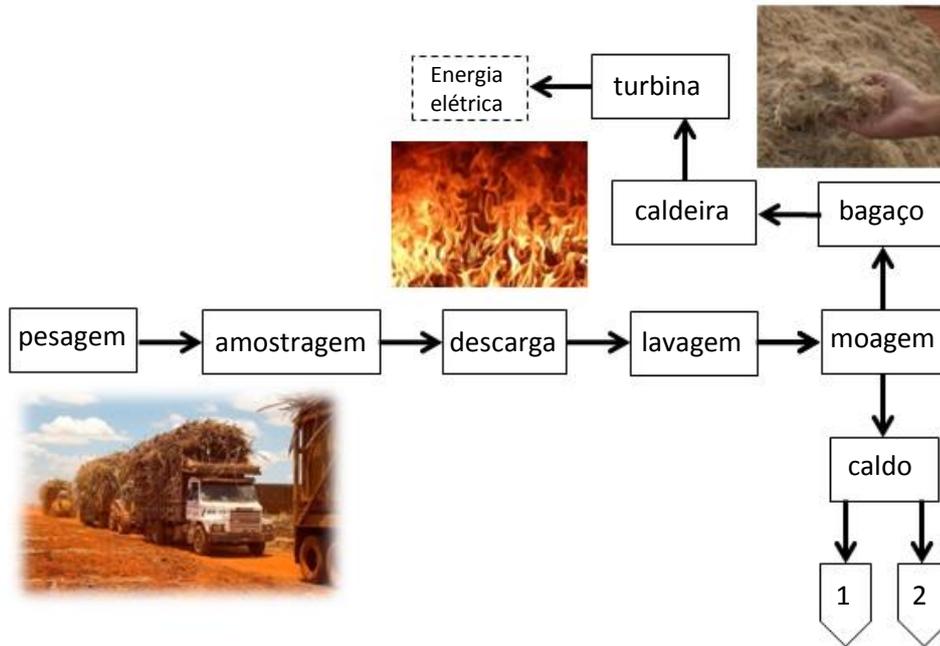
Segundo Rego e Hernández (2006), as usinas utilizam duas toneladas de bagaço para geração própria de energia. A sobra de bagaço é vendida para outras indústrias. No processo de produção de álcool, somente 43% do potencial da cana-de-açúcar é aproveitado. O bagaço da cana detém 50% do potencial energético da cana, e a vinhaça possui os 7% do potencial energético restantes da cana.

Segundo Alcarde (2007), a extração do caldo da cana consiste no processo físico de separação da fibra (bagaço), sendo feito, fundamentalmente, por meio de dois processos: moagem ou difusão. Na extração por moagem, a separação é feita por pressão mecânica dos rolos da moenda sobre o colchão de cana desfibrada e com adição de água. Já no processo de difusão, a separação é feita pelo deslocamento da cana desintegrada por um fluxo contracorrente de água.

O caldo extraído da cana pelo processo de moagem passa por dois tipos de tratamento.

¹**Colmo** é um tipo de caule encontrado nas gramíneas como: cana-de-açúcar, milho, arroz, bambu. Outra característica é que nós e entrenós são bem visíveis, e podem ser ocos (bambu) ou cheios (cana-de-açúcar).

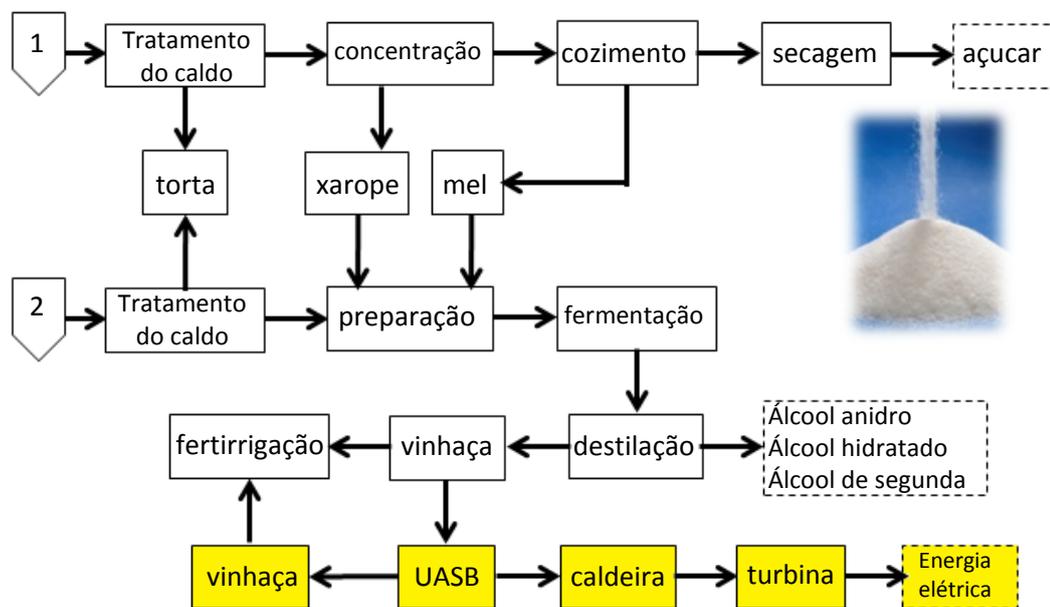
Figura 1 – Etapas do processamento da cana-de-açúcar



Fonte: Adaptado de Rego e Hernández, 2006

A figura 2 mostra as etapas desses tratamentos. No tratamento 1, é produzido o açúcar. No tratamento 2, são produzidos o álcool anidro, o álcool hidratado, o álcool de segunda geração e a vinhaça.

Figura 2 – Etapas do tratamento do caldo da cana-de-açúcar



Fonte: Adaptado de Rego e Hernández, 2006

A vinhaça que é gerada na destilação é utilizada para a fertirrigação². Para aproveitamento do seu potencial energético, a vinhaça pode ser utilizada como afluente do reator UASB, onde será gerado gás que poderá ser queimado para aquecimento de uma caldeira, cujo vapor irá movimentar uma turbina e gerará energia elétrica. A vinhaça efluente do reator UASB pode ser utilizada para a fertirrigação.

3.2 VINHAÇA

A vinhaça, também conhecida como vinhoto, tiborna ou restilo, é o principal resíduo líquido do processo de destilação dos produtos da cana-de-açúcar. É caracterizada como um líquido de coloração escura que contém os componentes do vinho não arrastados na etapa de destilação, além de quantidades residuais de açúcar, álcool e componentes voláteis mais pesados, de acordo com Rego e Hernández (2006). A figura 3 exibe um tanque de vinhaça. Dos efluentes líquidos da indústria sucroalcooleira, a vinhaça é a que possui maior carga poluidora.

Figura 3 – Tanque de vinhaça



Fonte: IBRA, 2014

² **Fertirrigação** é uma técnica de irrigação que utiliza a água da irrigação para levar nutrientes ao solo.

Em meados da década de 60, a preocupação quanto aos impactos do uso da vinhaça no ambiente e a contínua mortandade de peixes como consequência do despejo da vinhaça nos rios, gerou o Decreto-Lei nº 303, de 28 de fevereiro de 1967, que proibiu a sua deposição nos rios, lagos e cursos de água. A primeira aplicação da vinhaça foi nas chamadas “áreas de sacrifício”, áreas muito próximas às destilarias que sofriam a deposição de grande quantidade de vinhaça que ficavam inutilizadas para a agricultura, principalmente pelo efeito de salinidade do solo, tornando-o improdutivo e de difícil remediação (UNESP, 2013).

A vinhaça, gerada em grande quantidade, atualmente é utilizada como fertilizante. É um material com cerca de 2 a 6% de constituintes sólidos, onde se destaca a matéria orgânica, em maior quantidade. Em termos minerais, apresenta também quantidade apreciável de potássio (K) e médios de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), conforme descrito por Brito (2007). O vinhoto bruto (antes de qualquer tratamento) apresenta alto teor de nutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). O que desperta interesse para aproveitamento como fertilizante no próprio canavial.

Segundo Oliveira et al. (2009), sua utilização favorece a reposição de elementos essenciais para as plantas. Assim, o emprego da vinhaça como fertilizante deve ser realizado com cautela, principalmente levando-se em consideração sua origem.

De acordo com Camillotti et al. (2007), um dos problemas em se utilizar a vinhaça como fertilizante orgânico em cultivos de cana-de-açúcar, é o possível aumento do acúmulo de metais pesados no solo. No entanto, alguns destes elementos podem apresentar importância na nutrição de plantas como cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn). Já outros, como cromo (Cr) e níquel (Ni), apresentam-se importantes em determinadas situações. Cádmio (Cd) e chumbo (Pb), até o momento, não apresentaram qualquer relação de importância.

De acordo com Segato et al. (2006), se por um lado a produtividade agrícola é incrementada pela aplicação de vinhaça, a qualidade da cana, especialmente quando se aplicam doses elevadas, não é alterada no mesmo sentido, pois ocorre aumento no teor de cinzas do caldo.

Estas cinzas são classificadas como substâncias melacigênicas, ou seja, a presença dessas substâncias aumentam a solubilidade da sacarose, fazendo com

que haja menor recuperação desse açúcar na forma cristalizada. Apesar da qualidade da cana-de-açúcar ser comprometida, é verificada elevação da biomassa.

A vinhaça de alambique também foi analisada para o uso na fertilização de lavouras de cana. Oliveira et al. (2009) verificaram que houve resposta à aplicação de vinhaça de alambique bem como a redução no teor de fibras da cana-de-açúcar com a aplicação de doses crescentes.

Segundo Rego e Hernández (2006), quando aplicada adequadamente, cerca de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, a vinhaça equivale a uma adubação de 61 kg ha^{-1} de Nitrogênio, 40 kg ha^{-1} de Fósforo, 343 kg ha^{-1} de Potássio, 108 kg ha^{-1} de Cálcio e 80 kg ha^{-1} de Enxofre.

A vinhaça é composta de material químico, que pode ser percolado e lixiviado³ para o lençol freático. Há um pequeno risco do potássio e do nitrato poluir a água subterrânea devido à irrigação com vinhaça, visto que a lixiviação de íons abaixo da profundidade máxima de observação (1,20 m) das unidades coletoras é pequena. O vinhoto apresenta características que devem ser alteradas antes de seu uso na irrigação: temperatura elevada; alta concentração de material orgânico; alto teor de sólidos em suspensão; pH baixo.

A produção de vinhaça varia em função dos diferentes processos empregados na fabricação do álcool. Segundo Cortez e Happi (1992), para cada litro de álcool são produzidos 10 a 15 litros de vinhaça. Ludovice (1996), Paulino et al. (2011) apresentam outro balanço, no qual 13 litros de vinhaça são gerados para a mesma quantidade de álcool. Para a vinhaça de alambique, são obtidos de 8 a 10 L de vinhaça para cada litro de cachaça produzida, de acordo com os dados de Oliveira et al. (2009). O levantamento feito por Rego e Hernández (2006) nas destilarias do Nordeste brasileiro demonstra uma produção de até 20 m^3 de vinhoto bruto.

Segundo Silva et al (2007), dados encontrados para DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) mostraram variações de 20.000 a 35.000 mg L^{-1} e temperatura da vinhaça que sai dos aparelhos de destilação, variando de 85 a 90° C.

Segato et al. (2006) apresentam um tabela com as composições químicas de vinhaças oriundas de diferentes tipos de mostos, aqui apresentadas na Tabela 1:

³Lixiviação é o processo de extração de uma substância presente em componentes sólidos por meio da sua dissolução em um líquido. É um termo utilizado em vários campos da ciência, tal como a geologia, ciências do solo, metalurgia e química.

Tabela 1 – Composição química de vinhaça conforme o tipo de mosto

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
Ph	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temperatura (°C)	80 – 100	80 – 100	80 – 100
DBO (mgL ⁻¹ O ₂) ⁴	25.000	6.000 – 16.500	19.800
DQO (mg L ⁻¹ O ₂) ⁵	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg L ⁻¹)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg L ⁻¹)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg L ⁻¹ N)	450 – 1.610	150 – 700	480 – 710
Fósforo (mg L ⁻¹ P ₂ O ₅)	100 – 290	10 – 210	9 – 200
Cálcio (mg L ⁻¹ CaO)	450 – 5.180	130 – 1540	1.330 – 4.570
Magnésio (mg L ⁻¹ MgO)	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Sulfato (mg L ⁻¹ SO ₄)	6.400	600 – 760	3.700 – 3.730
Carbono (mg L ⁻¹ C)	11.200 – 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100
Relação C/N	16 – 16,27	19,7 – 21,07	16,4 – 16,43
Matéria Orgânica (mg L ⁻¹)	63.400	19.500	3.800
Subst. Redutoras (mg L ⁻¹)	9.500	7.900	8.300

Fonte – Segato et. al.; 2006

O biogás pode ser extraído da vinhaça por meio do processo de digestão anaeróbica.

⁴ DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio.

⁵ DQO – Demanda Química de Oxigênio.

3.3 DIGESTÃO ANAERÓBICA

A biodigestão anaeróbica é um fenômeno que ocorre em um equipamento chamado de reator e consiste na fermentação de resíduos com carga orgânica elevada – por exemplo, a vinhaça, ou mesmo dejetos de animais ou lixo orgânico doméstico.

ANEEL (2005) estimava que a biomassa representasse cerca de 14% de todo o consumo mundial de energia primária (óleo, carvão, gás, combustíveis renováveis e eletricidade). A digestão anaeróbica funciona como um ecossistema onde microrganismos trabalham na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico, amônia, entre outros. De acordo com Pinto (1999), por volta de 1844, Ulisse Gayo consegue provar que o gás metano pode ser produzido da fermentação de uma mistura de excrementos, palha de estábulo e água e discute suas propriedades. O metano também é produzido em ambientes naturais como pântanos.

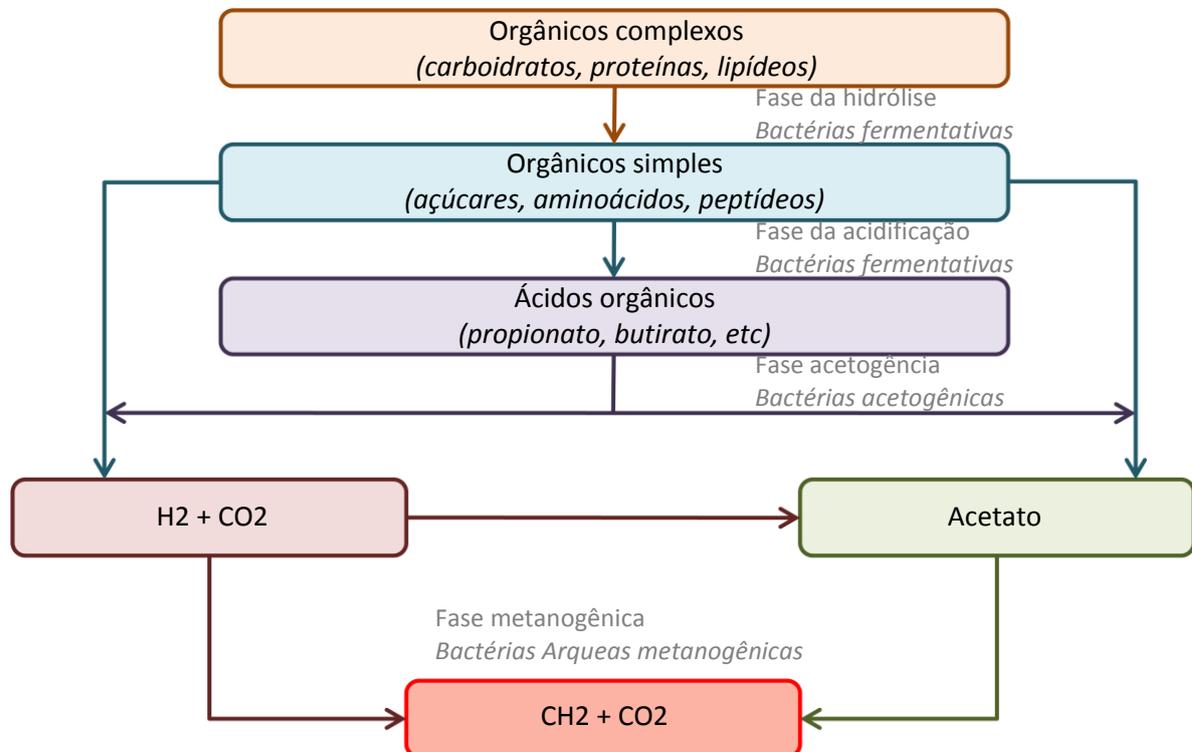
Em anos recentes, estudos da atmosfera mostraram que, aproximadamente, 0,5% da produção total anual de matéria seca, por fotossíntese, é transformada em metano, acumulando a quantidade de 800 milhões de toneladas do gás que é descarregada anualmente na biosfera, contribuindo para o chamado “efeito estufa”. De fato, o metano é considerado o segundo principal responsável pelo aquecimento global do planeta, atrás do dióxido de carbono, conforme Granato (2003).

Aproximadamente, 10% da matéria orgânica é mineralizada pela digestão anaeróbica com formação do metano.

Conforme Chernicharo (1997), a digestão anaeróbia é um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham na conversão de matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia e novas células bacterianas. O processo de digestão anaeróbica é simplificado em duas fases: acidogênica e metanogênica. Porém essas fases se dividem em outros processos metabólicos com participação de diversos grupos microbianos. Cada grupo microbiano tem funções específicas. Por meio da hidrólise e da fermentação, as bactérias fermentativas acidogênicas convertem compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em compostos mais simples, principalmente em ácidos orgânicos, hidrogênio e dióxido de carbono. Fatores como a temperatura do reator, tempo de resistência do substrato e pH do meio podem afetar o processo de

hidrólise. Os compostos orgânicos simples são convertidos em ácidos orgânicos, por meio de bactérias fermentativas, no processo chamado de acidogênese. Os compostos orgânicos intermediários (propionato, butirato) são convertidos em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono por microrganismos sintróficos acetogênicos. Esse processo é conhecido por acetogênese. Um grupo de microrganismos, denominados de arqueas metanogênicas, converte o acetato e o hidrogênio em metano e dióxido de carbono. Na figura 4 ilustram-se as rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.

Figura 4 – Etapas da fermentação anaeróbica para produção de Metano



Fonte: Adaptado de Chernicharo, 1997

A digestão anaeróbica realiza a fermentação dos resíduos transformando-os em compostos orgânicos mais simples e em biogás. Esse processo ocorre no reator UASB.

3.4 REATOR UASB

Um biodigestor pode ser definido como a câmara onde se processa a biodigestão anaeróbica. Trata-se de um recipiente fechado, construído de alvenaria, concreto ou outros materiais onde a matéria prima a ser digerida é colocada. O gás produzido é armazenado no Gasômetro, geralmente construído de chapa metálica e, dependendo do tipo de digestor, pode ser a própria parede de concreto ou alvenaria. Os Gasômetros mais modernos são construídos de fibra de vidro, plástico e outros materiais, consoante com Prakasan et. al.(1984). Na figura 5 observa-se o reator UASB em construção.

Figura 5 – Reator de manta de lodo em construção

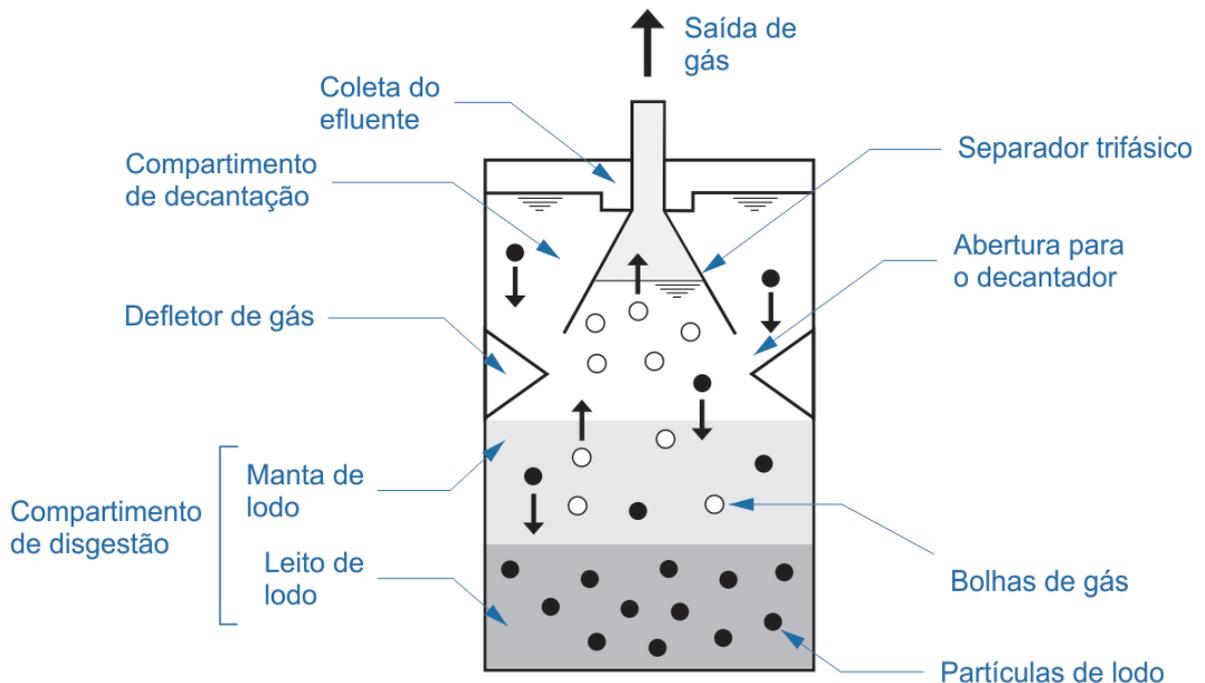


Fonte: Fibratécnica, 2014

Há diversas modalidades de reatores que podem ser utilizados para o processo de biodigestão. Entretanto este trabalho irá focar no modelo conhecido como UASB. Segundo Khemkhao et al. (2012), o reator UASB permite a degradação

anaeróbica da matéria orgânica do efluente e de sua posterior separação sólida, líquida e gasosa. Este reator consegue tratar águas residuárias com elevado teor de sólidos suspensos e fornece alta produção de metano. Na figura 6 observa-se o desenho esquemático do reator UASB.

Figura 6 – Desenho esquemático de um reator UASB



Fonte: Adaptado de Chernicharo, 1997

De acordo com Gaspar (2003), o princípio de funcionamento de um reator do tipo UASB consiste da entrada da água residuária pela parte de baixo por meio de tubos de alimentação, os quais entram em contato com a zona de lodo.

As bactérias presentes no lodo iniciarão o processo de degradação dos componentes biodegradáveis que serão convertidos em biogás. Conforme Chernicharo (1997), o separador trifásico instalado na parte superior do reator é necessário para a manutenção do lodo anaeróbico dentro do reator. Após a separação do gás contido na mistura líquida, o lodo é separado da massa líquida no compartimento de decantação e retornado ao leito do lodo.

3.5 BIOGÁS

Atribui-se o nome de biogás à mistura gasosa (combustível), resultante da fermentação anaeróbica da matéria orgânica. A mistura é essencialmente constituída por metano (CH_4) e por dióxido de carbono (CO_2). É um composto inflamável. Seu poder calorífico está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa.

Segundo Rodrigues et al. (2012), o grau de pureza do biogás está associado, portanto, a uma maior ou menor presença de CH_4 na mistura gasosa. Os compostos orgânicos podem ser tratados por via anaeróbia nos chamados digestores anaeróbios, os quais têm sido aplicados largamente para o tratamento de resíduos diversos provenientes de culturas agrícolas, dejetos de animais, lodos de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e lixo urbano.

O uso da digestão anaeróbia também pode ser aplicado em agroindústrias, indústrias de bebidas e alimentícias, incluindo efluentes de indústrias sucroalcooleiras como, por exemplo, a vinhaça. Esta pode ser tratada em reatores anaeróbios específicos para a obtenção de gás metano ou biogás, conforme Chernicharo (1997).

Conforme Royá et al. (2011), o biogás é considerado um biocombustível por ser uma fonte em que se pode obter energia de efluentes ou biomassas, naturalmente ou artificialmente, sendo que, artificialmente, para a sua obtenção, é preciso obedecer a critérios de fermentação, temperatura, umidade, acidez e ausência de oxigênio.

De acordo com Prakasan et al. (1984), no Brasil, os produtos da biomassa, que em 1940 apresentavam em conjunto 77% do consumo energético, passaram a representar somente 29% em 1975, visto que o modelo tecnológico adotado pelo mundo moderno apoiou-se, muito cedo, no mineral, gás natural e petróleo.

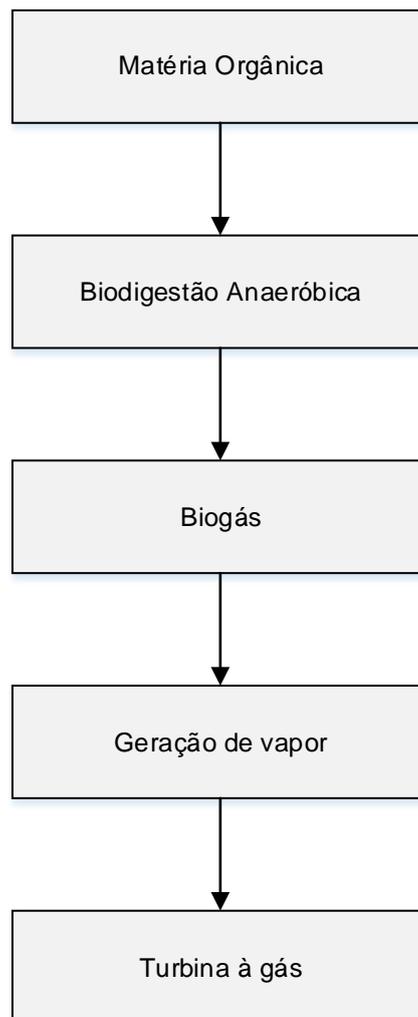
Além da proposta de se criar uma fonte de energia alternativa, a queima do biogás é muito mais vantajosa em relação à queima dos combustíveis fósseis porque, no segundo caso, a taxa de CO_2 na atmosfera sofre um aumento, o que não ocorre na queima do biogás, pois a produção de CO_2 é equilibrada com o consumo do mesmo na fotossíntese da cana-de-açúcar, consoante com Granato (2003).

Para Lamo (1991), obtêm-se, por meio da vinhaça, 0,30 litros de CH_4/gDQO consumida, sendo que a proporção de metano (CH_4) no biogás é de 55 a 65%, sendo o restante dióxido de carbono (CO_2).

Chernicharo (1997) realça que a aplicabilidade da digestão anaeróbia depende de forma muito mais significativa da temperatura dos efluentes, devido à baixa atividade das bactérias anaeróbias em temperaturas abaixo de 20°C e a inviabilidade de aquecimento dos reatores, tornando o método antieconômico. Assim, o Brasil é colocado em uma posição de vanguarda em nível mundial.

Na figura 7 ilustram-se as etapas de produção e de utilização do biogás para geração de eletricidade. A matéria orgânica por meio do processo de biodigestão anaeróbica produz biogás. O biogás é utilizado para a geração de vapor que alimentará uma turbina a gás que gerará eletricidade.

Figura 7 – Etapas da Produção e Utilização do Biogás



4 JUSTIFICATIVA

Segundo reportagem de Mascarenhas (2014), a situação energética do país preocupa com seus reservatórios esvaziados, usinas com impasses para construção e possibilidade de novos custos ao consumidor. As discussões têm adotado mais um viés político do que um compromisso com soluções para estabilizar a oferta de energia do país.

A indústria canvieira tem-se mostrado uma boa fonte de matéria-prima para geração de energia limpa, com a expansão do setor sucroalcooleiro no Brasil nas últimas décadas e com a crescente produção de álcool pelas usinas.

A tecnologia de produção de álcool no Brasil é uma das alternativas à substituição do uso de combustível fóssil utilizado para movimentar a frota veicular. A crescente demanda pelo álcool automotivo faz com que se gere, a partir de sua produção, um grande volume de resíduos de vinhaça. Faz-se necessário dar a destinação e o uso correto a este resíduo.

A biodigestão anaeróbia apresenta-se como uma alternativa para o tratamento da vinhaça. Um uso inovador para a vinhaça tem sido a produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbica para a produção de eletricidade, que é gerado no processo de fabricação de álcool da cana-de-açúcar. Em condições normais de temperatura e pressão, um litro de vinhaça gera cerca de 13 litros de biogás, com, aproximadamente, 50% de metano e, aproximadamente, 35% de dióxido de carbono. A vinhaça produzida na safra de 1997/1998 produziria combustível para movimentar 23 mil ônibus de transporte coletivo urbano, conforme descrito por Pinto (1999).

A simulação do reator UASB, que gera biogás por meio da biodigestão da vinhaça de cana-de-açúcar, poderá ser uma ferramenta para o aprimoramento das atividades dos profissionais e pesquisadores que trabalham com processos anaeróbicos da produção do etanol a partir da cana-de-açúcar. O simulador poderá ser um aliado e fonte de informação para que se possa tomar decisões quanto à implantação ou não deste processo, e uma ferramenta de trabalho para as unidades sucroalcooleiras que optarem por este tipo de geração de energia limpa.

5 METODOLOGIA

A simulação da conversão de vinhaça em biogás foi feita a partir das equações utilizadas em projetos de reatores anaeróbicos para tratamento de esgoto doméstico, encontradas em Chernicharo (1997). A vinhaça de cana-de-açúcar possui maior DQO e temperaturas mais elevadas quando comparada com o esgoto doméstico. A produção de biogás está diretamente ligada ao DQO do efluente. Para a simulação, foi construído um programa de computador baseado no reator anaeróbico UASB, o código foi implementado em *Object Pascal*, utilizando o programa Lazarus. O Lazarus é uma IDE (Integrated Development Environment) multiplataforma, ou seja, pode ser executado em diferentes sistemas operacionais, como o Windows, Linux, Mac OS X, FreeBSD e outros, para desenvolvimento de aplicações. Possui uma variedade de componentes prontos para uso e um formulário de designer gráfico que permite criar interfaces gráficas. A versão utilizada do Lazarus foi a #:1.0.12. O simulador permite que os dados simulados sejam salvos em um histórico. Para a funcionalidade de histórico foi utilizado o banco de dados Firebird versão 2.5. O Firebird é um banco de dados relacional com características padrão ANSI SQL. A plataforma para desenvolvimento utilizada é o Sistema Windows de 32 bits.

Os parâmetros que devem ser informados são referentes às características da vinhaça, e este simulador utiliza os seguintes parâmetros:

- Vazão média do afluente em m^3/d ;
- Vazão máxima do afluente em m^3/d ;
- DQO do afluente em mg/L ;
- DBO do afluente em mg/L ;
- Temperatura da vinhaça;
- Altura do reator.

O sistema utiliza a seguinte constante:

- Coeficiente de produção de sólidos em termos de DQO.

O simulador consiste de uma interface com duas abas. Na aba Simulação o usuário deve informar os parâmetros e as constantes necessários ao processo de simulação. A aba Histórico exibe o histórico dos parâmetros já utilizados para as simulações. A interface do programa é ilustrada na figura 8

Figura 8 – Interfaces do Simulador

a)

Simulação	Vazão média	Vazão máxima	DBO	DQO	T
2	1				

b)

Fonte: Do Autor, 2014

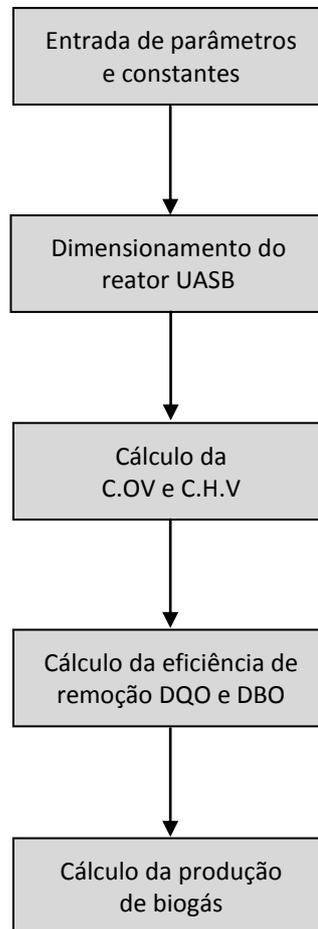
a) Aba Simulação

b) Aba histórico

5.1 ETAPAS DA SIMULAÇÃO

As etapas da simulação são esquematizadas na figura 9.

Figura 9 – Etapas da simulação



Fonte: Do Autor, 2014

5.1.1 Entrada de parâmetros e constantes

A primeira etapa no processo de simulação consiste na entrada dos valores dos parâmetros da vinhaça e dos valores das constantes pela interface do simulador. Abaixo são listados os nomes das variáveis que permitem identificar esses valores nas equações e fórmulas utilizadas pelo simulador:

- $Q_{\text{méd}}$ – Vazão afluente média (m^3/d);
- $Q_{\text{máx}}$ – Vazão afluente máxima (m^3/d);
- DQO_{S0} – DQO afluente inicial (mg/L);
- DBO_{S0} – DBO afluente inicial (mg/L);
- T – Temperatura do afluente ($^{\circ}\text{C}$);

- Y_{abs} – Coeficiente de produção de sólidos em termos de DQO;
- TDH – Tempo de retenção hidráulica.

5.1.2 Dimensionamento do reator UASB

Para o dimensionamento do reator, é necessário o cálculo da carga média de DQO e do valor do TDH (Tempo retenção hidráulica). O TDH consiste do tempo que o afluente deve permanecer dentro do reator. O valor da carga média de DQO é obtido pela equação 1.

$$DQO_{LO} = DQO_{SO} \times Q_{méd} \quad (1)$$

Onde:

DQO_{LO} – carga média de DQO;

DQO_{SO} – DQO do afluente de entrada;

$Q_{méd}$ – vazão média do afluente.

O TDH necessário ao processo depende da temperatura do afluente de acordo com a Tabela 2. O simulador permite a definição do valor do TDH personalizada.

Tabela 2 – Tempos de retenção hidráulica em reatores UASB

Temperatura (°C)	Tempo de retenção hidráulica (h)	
	Média diária	Mínimo (durante 4 a 6 h)
16 – 19	> 10 - 14	> 7 - 9
20 – 26	> 6 - 9	> 4 - 6
> 26	> 6	>4

Fonte: Chernicharo, 1997

O volume total do reator é obtido pela equação 2.

$$V_{Reator} = DQO_{LO} \times TDH \quad (2)$$

Onde:

V_{Reator} – Volume total do reator;

DQO_{LO} – Carga média de DQO;

TDH – Tempo de retenção hidráulico.

O simulador possibilita que o volume do reator seja personalizado e, caso o volume do reator seja menor que o volume do afluente de vinhaça, haverá a modularização dos reatores. Ou seja, o sistema considera que serão utilizados vários reatores para suportar o volume de vinhaça.

5.1.3 Cálculo da C.O.V e C.H.V.

A equação 3 permite o cálculo da Carga Orgânica Volumétrica.

$$COV = \frac{Q \times S}{V} \quad (3)$$

Onde:

COV – Carga orgânica volumétrica (kgDQO/m³.d);

Q é a vazão (m³/d);

S é a concentração de substrato afluente (kgDQO/m³);

V é o volume total do reator (m³).

A equação 4 permite o cálculo da carga hidráulica volumétrica.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (4)$$

Onde:

CHV – carga hidráulica volumétrica (m³/m³.d);

Q – a vazão (m³/d);

V – o volume do reator (m³).

A equação 5 permite o cálculo da velocidade superficial.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

Onde:

v – velocidade superficial do fluxo (m/h);

Q – vazão (m³/h);

A – área da seção transversal do reator (m²).

A velocidade superficial deve estar de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 – Velocidade de acordo com a vazão

Vazão	Velocidade superficial (m/h)
Vazão média	0,5 - 0,7
Vazão máxima	0,9 - 1,1
Picos temporários	< 1,5

Fonte: Chernicharo, 1997

5.1.4 Cálculo da eficiência de remoção de DQO e DBO

A estimativa da eficiência de remoção de DQO é obtida através da equação 6.

$$E_{DQO} = 100 \times (1 - 0,68 \times TDH^{-0,35}) \quad (6)$$

Onde:

E_{DQO} – eficiência do reator UASB em termos de remoção de DQO (%);

TDH – tempo de retenção hidráulica;

0,68 – constante empírica;

0,35 – constante empírica.

A eficiência de remoção de DBO do sistema pode ser obtida através da equação 7.

$$E_{DBO} = 100 \times (1 - 0,7 \times TDH^{-0,5}) \quad (7)$$

Onde:

E_{DBO} – eficiência do reator UASB em termos de remoção da DBO (%);

TDH – tempo de retenção hidráulica;

0,7 – constante empírica;

0,5 – constante empírica.

A estimativa da concentração de DQO e de DBO no efluente final é obtida através da equação 8.

$$S = S_0 - \frac{E \times S_0}{100} \quad (8)$$

Onde:

S – concentração de DQO ou de DBO efluente (mg/L);

S_0 – concentração de DBO ou DQO do afluente (mg/L);

E – eficiência de remoção de DQO ou de DBO (%).

5.1.5 Cálculo da produção de biogás

Para o cálculo da produção de metano, são necessárias as equações 9, 10 e 11. A equação 9 calcula a conversão de DQO em gás metano.

$$DQO_{CH_4} = Q_{med} \times (S_0 - S) - Y_{abs} \times Q \times S_0 \quad (9)$$

Onde:

Q_{med} – Vazão média do afluente;

DQO_{S_0} – DQO do afluente inicial;

S_{DQO} – Estimativa de concentração do DQO;

Y_{abs} – Coeficiente de produção de sólidos.

A conversão da massa de metano ($kgDQO_{CH_4}/d$) em produção volumétrica (m^3CH_4/d) pode ser feita através das equações 10 e 11.

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (10)$$

Onde:

Q_{CH_4} – produção volumétrica de metano (m^3/d);

$K(t)$ – fator de correção para a temperatura operacional do reator ($kgDQO/m^3$).

$$K(t) = \frac{P \times K}{R \times (273 + t)} \quad (11)$$

Onde:

P – pressão atmosférica (1 atm);

K é o DQO correspondente a um mol de CH_4 (64 gDQO/mol);

R é a constante dos gases (Atm.L/mol.°K);

t – temperatura operacional do reator (°C).

A avaliação da produção de biogás é feita pela estimativa do percentual de metano no biogás. Chernicharo (1997) adota um percentual de 75% de metano no biogás, como na equação 12.

$$Q_{biog\acute{a}s} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (12)$$

Onde:

Q_{CH_4} – volume de biogás;

C_{CH_4} – concentração de metano (entre 70 a 80%).

5.2 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO

Para o estudo da produção de biogás, optou-se por analisar a influência de quatro variáveis: DQO, temperatura, tempo de retenção hidráulica e vazão. De acordo com Chernicharo (1997), a produção de metano pode ser feita a partir da degradação de DQO. A temperatura afeta a produção do metano devido à formação microbiana do metano ocorrer numa faixa de temperatura entre 0°C a 97°C. Projetos de reatores com o TDH inferior ao necessário causam falhas do sistema, pois o tempo de permanência da biomassa não é suficiente para o processo de biodigestão. A vazão implica na quantidade de biomassa que estará disponível para conversão.

Para o estudo da influência dessas quatro variáveis, analisadas na produção de biogás, inicialmente, foram simulados os resultados referentes a um planejamento fatorial a dois níveis, 2^K , de acordo com Barros Neto et. al. (2010), em que K representa o número de variáveis do sistema tomadas a 2 níveis ou valores cada, tendo como finalidade determinar quais das variáveis selecionadas exercem significativa influência na produção de gás. A tabela 4 mostra os experimentos para simulação.

Tabela 4 – Análise estatística da produção de biogás

EXP	TDH	DQO	Q	T
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

Fonte: Do Autor, 2014

Os resultados do Planejamento Estatístico estão descritos em Resultados e Discussão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físico-químicas da vinhaça de Previtali (2010) foram utilizadas para simulação da geração de biogás. A tabela 5 contém a informação dos valores utilizados como parâmetros e a quantidade de biogás que foi produzida. O TDH usado na simulação foi de 7 horas.

Tabela 5 – Simulação da produção de biogás com TDH de 7 horas

Descrição	Concentrações		
	Mínimo	Média	Máximos
Dados do Processo			
Vazão [m ³ /d]	530	1909	4128
Caracterização da Vinhaça			
DBO [mg/l]	6680	16949	75330
DQO [mg/l]	9200	28450	97400
Temperatura [°C]	65	89	110
Simulação			
Produção de biogás [m ³ /d]	1254,87	15071,41	113821,62

Fonte: Adaptado de Previtali, 2010

Para testes de simulação, foram considerados dois cenários. No primeiro cenário, foi feita a simulação da geração de biogás com uma vazão de vinhaça de 530 m³/d, sendo simulados a geração, considerando temperaturas de 65°C e 89°C, valores de DQO de 9200 mg/l, 28450 mg/l e 97400 mg/l e tempos de retenção hidráulica de 5h, 11h e 17h. O resultado da simulação do primeiro cenário é mostrado na tabela 6.

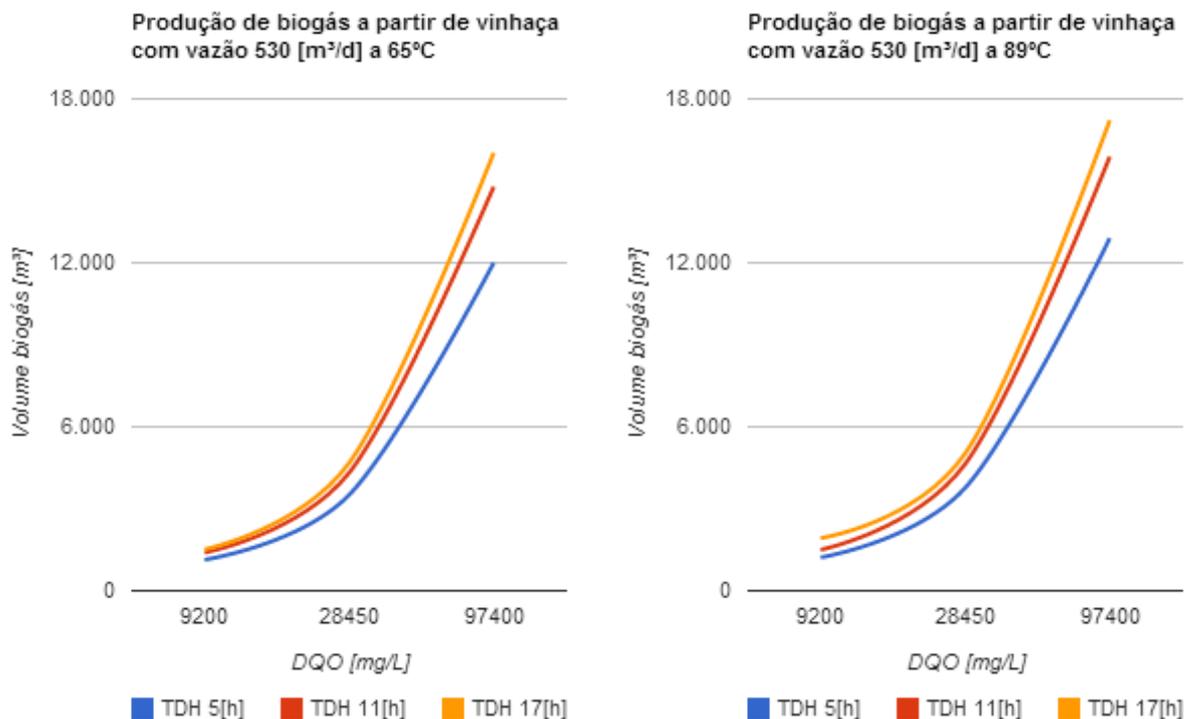
Tabela 6 – Simulação da produção de biogás a partir de vinhaça com vazão 530 m³/d

DQO [mg/L]	TDH 5[h]	TDH 11[h]	TDH 17[h]
Temperatura 65°C			
9200	1133,82	1396,58	1513,43
28450	3506,21	4318,77	4680,11
97400	12003,68	14785,51	16022,58
Temperatura 89°C			
9200	1218,19	1500,51	1926,05
28450	3767,14	4640,16	5028,39
97400	12896,98	15885,83	17214,95

Fonte: Do Autor, 2014

A figura 10 mostra as curvas da produção contida na tabela 6.

Figura 10 – Simulação da produção biogás a partir de vinhaça com vazão 530 m³/d



a)

b)

Fonte: Do autor, 2014

De acordo com a simulação, o TDH pode compensar a produção de biogás para efluentes com as mesmas características de vazão, mesmo valor de DQO, porém com temperaturas menores. Um efluente com vazão de 530 m³/d a 65°C e DQO de 9200 mg/L e TDH de 11 horas apresentou maior produção de biogás que o efluente de mesma vazão, mesmo DQO, temperatura superior e TDH de 5 horas.

Ao se comparar efluentes de mesma vazão, mesma DQO, mesmo TDH e com temperaturas diferentes, nota-se que um aumento na temperatura provoca um aumento de cerca de 6% na produção de biogás, sendo que a maior temperatura nas mesmas condições produz mais biogás. Esse resultado pode ser observado ao se analisar a figura 10, que mostra as curvas de produção de biogás para vinhaça com vazão de 530 m³/d e temperaturas de 65°C (a) e 89°C(b).

No segundo cenário para simulação, a vazão de vinhaça foi aumentada para 1909 m³/d. Os valores de temperatura, DQO e TDH foram os mesmos do primeiro cenário. O resultado da simulação do cenário 2 mostrou o mesmo comportamento do cenário 1, com o aumento da produção de biogás proporcional ao aumento da vazão. Os resultados dessa simulação são exibidos na tabela 7.

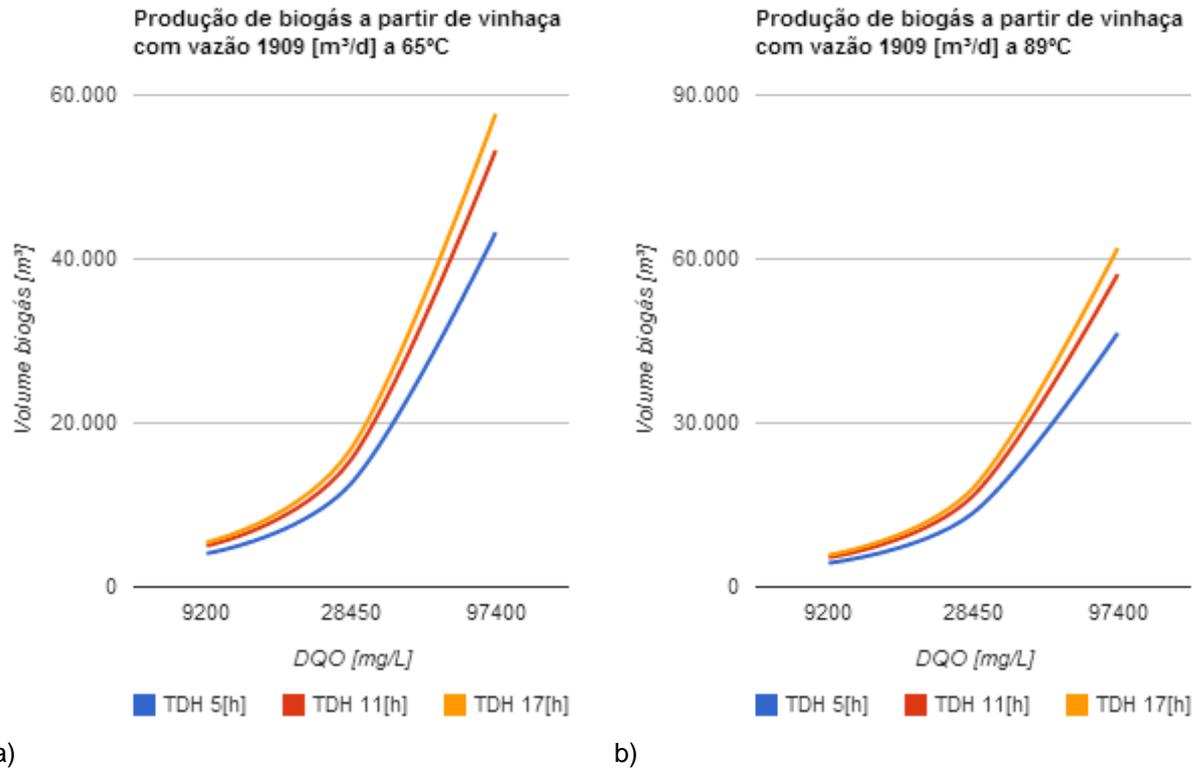
Tabela 7 – Simulação da produção de biogás a partir de vinhaça com vazão 1909 m³/d

DQO [mg/L]	TDH 5[h]	TDH 11[h]	TDH 17[h]
Temperatura 65°C			
9200	4083,88	5030,32	5451,19
28450	12628,97	15555,70	16857,21
97400	43235,90	53255,73	57711,50
Temperatura 89°C			
9200	4387,80	5404,66	5856,86
28450	13568,80	16713,34	18111,70
97400	46453,45	57218,95	62006,31

Fonte: Do autor, 2014

Na figura 11 apresentam-se as curvas referentes à simulação da vazão de 1909 m³/d.

Figura 11 – Simulação da produção de biogás a partir de vinhaça com vazão 1909 m³/d



a)
Fonte: Do Autor, 2014

b)

A tabela 8 mostra os valores utilizados na simulação, considerando os dois valores para cada variável, o valor de máximo (+) e o valor de mínimo (-). Esses valores serão usados para o Planejamento Estatístico.

Tabela 8 – Valores de máximo e mínimo das variáveis

Variáveis	Nível (+)	Nível (-)
T [°C]	89	65
DQO [mg/L]	28450	9200
VAZÃO [m ³ /d]	1909	530
TDH [h]	11	5

Fonte: Do Autor, 2014

A tabela 9 mostra os dados obtidos pela simulação, considerando os dois valores de cada variável, o valor de máximo (+) e o valor de mínimo (-) e o valor obtido da resposta, que é o volume de gás produzido.

Tabela 9 – Análise estatística da produção de biogás

EXP	TDH	DQO	Q	T	Biogás [m ³]
1	-	-	-	-	1133,82
2	+	-	-	-	1396,58
3	-	+	-	-	3506,11
4	+	+	-	-	4318,77
5	-	-	+	-	4083,88
6	+	-	+	-	5032,32
7	-	+	+	-	12628,97
8	+	+	+	-	15555,70
9	-	-	-	+	1218,19
10	+	-	-	+	1500,51
11	-	+	-	+	3767,14
12	+	+	-	+	4640,16
13	-	-	+	+	4387,80
14	+	-	+	+	5404,66
15	-	+	+	+	13568,80
16	+	+	+	+	16713,34

Fonte: Do Autor, 2014

Analisando a influência do TDH, quando ocorre aumento dessa variável, passando de seu valor de mínimo para o valor de máximo, com todas as variáveis analisadas no seu valor mínimo, há aumento da resposta, e o mesmo ocorre quando essa variável é aumentada, passando de seu valor de mínimo para o valor de máximo, com todas as variáveis analisadas no seu valor máximo. Isto significa que a variável TDH tem influência significativa na resposta, que é o volume de gás produzido.

Houve aumento da resposta em relação à variável DQO, quando se compara o valor do gás produzido no experimento 1 com o experimento 3, em que a DQO

passa de mínimo para máximo, e todas as demais variáveis permanecem no seu valor de mínimo. A resposta também aumenta na comparação do experimento 14 com o experimento 16, quando a variável DQO passa de seu valor de mínimo para o seu valor de máximo, e as demais variáveis permanecem no valor de máximo.

O experimento 5, onde a variável Q possui valor máximo e as demais variáveis possuem valores mínimos, apresentou aumento da resposta quando comparado ao experimento 1, onde a variável Q possui valor de mínimo e todas as variáveis tem valores mínimos. Na análise do experimento em que todas as quatro variáveis possuem valor máximo com o experimento onde apenas a variável Q possui valor mínimo, também houve aumento da resposta. Esses experimentos são o 16 e o 12.

A variável T apresentou comportamento análogo às outras variáveis, com a resposta aumentando quando a variável T também aumenta, nos experimentos 1 e 9, e também nos experimentos 8 e 15.

Por intermédio da análise estatística empregada neste trabalho, observa-se que todas as variáveis selecionadas são significativas para a produção de biogás.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um simulador para análise da produção de biogás por meio da digestão da vinhaça. Foram realizadas simulações a partir de um conjunto de equações que descrevem o comportamento da biodigestão anaeróbica da vinhaça em reator UASB.

Foi realizado um planejamento das simulações para análise de quatro variáveis do sistema, por meio de um planejamento fatorial 2^K , no qual as variáveis foram selecionadas usando os seus valores de máximo (nível +1) e de mínimo (nível -1).

Os resultados obtidos com este simulador permitiram as seguintes conclusões:

- Todas as variáveis analisadas se mostraram significativas para a produção de biogás;
- Um aumento na temperatura resultou no aumento do volume de biogás produzido, provavelmente porque altas temperaturas facilitam a biodigestão;
- Um aumento na DQO resultou no aumento do volume de biogás produzido, pois há aumento na conversão do gás;
- Um aumento na vazão de vinhaça também aumenta o volume de biogás produzido, pois isto significa que há mais massa que entra no sistema;
- Um aumento no TDH resultou no aumento do volume de biogás, pois implica maior tempo de contato da massa no reator.

O simulador desenvolvido neste trabalho pode ser usado para avaliar a produção de biogás, ou metano, com quaisquer características da vinhaça.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Implementar um planejamento a três níveis para avaliação mais detalhada das variáveis aqui analisadas;
- Realizar um estudo experimental utilizando microrganismos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed.. Brasília: ANEEL, 2005.
- ALCARDE, R. A. Processamento da cana-de-açúcar. Brasília, DF: Embrapa, 2007. Disponível em: <<http://goo.gl/uvGqTg>>. Acesso em: 14 maio 2014.
- AMATO, F. **Nível dos reservatórios do sudeste e centro-oeste é o menor desde 2001**. G1, Brasília. 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/WiRFQo>>. Acesso em: 29 abr. 2014.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos**. 4ª ed. São Paulo: Bookman, 2010.
- BRITO, Fabio L. et al . Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande , v. 11, n. 3, June 2007 . Available from <<http://goo.gl/7NoqXG>>. Acesso em 14 mai. 2014.
- CAMILOTTI, F. et. al. Acúmulo de metais pesados em cana-de-açúcar mediante a aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p.284 – 293, jan./abr. 2007.
- CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbicos**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA - UFMG, 1997.
- CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canaveira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v.2, n. 2, 1992.
- FIBRATÉCNICA: Engenharia e Saneamento. Disponível em: <<http://goo.gl/lytk37>>. Acesso em: 14 mai. 2014.
- GASPAR, P. M. F. "**Pós-tratamento de efluente de reator UASB em sistema de lodos ativados visando a remoção biológica do nitrogênio associada à remoção físico-química do fósforo**". 2003. Dissertação (Mestrado) - EPUSP.
- GRANATO, E. F. **Geração de Energia Através da Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça**. 2003. f.124 Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia, UNESP, Bauru.
- IBRA: Laboratório Ambiental. Disponível em: <<http://goo.gl/OvtqFb>>. Acesso em: 14 de mai. 2014.
- KHEMKHAO, M. et al. **Uasb performance and microbial adaptation during a transition from mesophilic to thermophilic treatment of palm oil mill effluent**. Journal of environmental management. Elsevier, v. 103, p.74-82. jul. 2012.
- LAMO, P. de. **Sistema produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais – METHAX/BIOPAQ – CODISTIL – Piracicaba**, 1991.

LINDEMEYER, R. M. **Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica**. 2008. Monografia (Graduação em Bacharel em Administração) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. **Estud. av.**, São Paulo, v. 23, n. 65, 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/zQIKdQ>>. Acesso em: 25 abr. 2014.

LUDOVICE, M. T. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. 1996. Dissertação (Mestrado) FEC-UNICAMP, Campinas.

MASCARENHAS, Pamela. **Demanda por energia no Brasil é insustentável**. 2014. Jornal do Brasil. Disponível em: <<http://goo.gl/7AMMbF>>. Acesso em: 15 maio 2014.

OLIVEIRA, E. L. de; ANDRADE, L. A. de; FARIA, M. A. de; EVANGELISTA, A. W. P.; MORAIS, A. R. de. Uso de vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada e não irrigada. **Pesq. agropec. Bras.**, Brasília, v. 44, n. 11, p. 1398 – 1403, nov. 2009.

PAULINO, J. et. al. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo II. Características da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 15, p. 244 – 249, 2011.

PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel S.A., 1989.

PINTO, C. P. **Tecnologia da Digestão Anaeróbica da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**. 1999. f. 144. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas.

PRAKASAN, K.; CARVALHO FILHO, J. V. de; PERAZZO NETO, A. **Tecnologia do biogás**. Aréia: CCA - UFPB, 1984.

PREVITALI, N. R. **Uso de vinhaça para fertirrigação**. 2011. Monografia (Graduação em CURSO DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS) - FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ARAÇATUBA. Araçatuba.

REGO, E. E.; HERNANDEZ, F. D. M. Eletricidade por digestão anaeróbica da vinhaça de cana-de-açúcar: contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: <<http://goo.gl/cTgNAS>>. Acesso em: 27 abr. 2014.

RODRIGUES, Altair. et al. **Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da vinhaça**. Acta iguazu: Unioeste. Cascavel/PR, 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/pn0n00>>. Acesso em: 14 maio 2014.

ROYA, B.; FREITAS, E.; BARROS, E. M.; ANDRADE, F.; PRAGANA, M. Biogás – Uma Energia Limpa. **Revista Eletrônica Novo Enfoque**, v. 13, n. 13, p. 142 – 149, 2011.

SANTANA, Adriana M. de; OLIVEIRA, Roberto A. de. **Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura.** Eng. Agríc., Jaboticabal , v. 25, n. 3, Dec. 2005. Disponível em <<http://goo.gl/ibQcii>>. Acesso em: 15 mai. 2014.

SEGATO, V. S. et. al. **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: Prol Editora e Gráfica, 2006.

SILVA, Mellissa A. S. da; GRIEBELER, Nori P.; BORGES, Lino C.. **Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático.** Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande , v. 11, n. 1, Fev. 2007. Disponível em <<http://goo.gl/asdjuc>>. Acesso em 15 mai. 2014.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol: safra 2012/2013.** Disponível em: <<http://goo.gl/IA3vim>>. Acesso em: 15 mai. 2014.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. **Termo de referência para o workshop tecnológico – vinhaça.** 2013. Disponível em: <http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Termo_de_Referencia_Vinhaca.pdf>. Acesso em: 17 de nov. 2013.