

ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA E BAGAÇO DE CANA

EVALUATION OF BIOGAS GENERATION POTENTIAL FROM ANAEROBIC BIODIGESTION OF VINASSE AND SUGARCANE BAGASSE

Mauricio Cabral Penteado¹, Waldir Nagel Schirmer², David Cardoso Dourado³, Matheus Victor Diniz Gueri⁴

^{1, 2, 3, 4} Universidade Estadual do Centro Oeste, Iraty, Paraná, Brasil - mauriciocabralpenteado@gmail.com, wanasch@yahoo.com.br, davidourado@unifesspa.edu.br & mgueri@hotmail.com

RESUMO

Considerando a busca por fontes de energias alternativas aos combustíveis fósseis, o presente trabalho teve como objetivo analisar o potencial de geração de biogás a partir da codigestão da vinhaça e bagaço de cana-de-açúcar em reatores de bancada próprios à determinação do potencial bioquímico de metano (BMP). Para isso, a produção de biogás foi avaliada durante 21 dias de biodigestão em biodigestores anaeróbios de bancada sob condições mesofílicas e regime de batelada. A pressão interna dos frascos foi monitorada diariamente, a qual foi convertida em termos de geração de biogás diária e acumulada. Parâmetros como pH, demanda química de oxigênio (DQO) e umidade foram medidos nos três tratamentos avaliados (vinhaça, bagaço e codigestão da vinhaça e bagaço), de modo a relacioná-los com a produção de biogás observada no período de biodigestão. A biodigestão da vinhaça e codigestão da vinhaça e bagaço de cana apresentaram o mesmo volume de biogás acumulado (próximo aos 2,5 mL) ao longo do período de incubação. Portanto, pelas condições do experimento adotadas neste estudo, os dois substratos avaliados não mostraram potencial de geração de biogás satisfatório, mesmo quando codigeridos. Desse modo, pode-se inferir que adição de um inóculo pode auxiliar a ativação do potencial de geração de biogás.

PALAVRAS-CHAVE: Bioenergia, Energias renováveis, Indústria sucroalcooleira, Potencial bioquímico do metano.

ABSTRACT

Considering the search for alternative sources of energy to fossil fuels, the present work focuses on analyzing the potential for biogas generation from the co-digestion of vinasse and sugarcane in bench reactors proper to the determination of biochemical potential of methane (BMP). For this purpose, biogas production has been evaluated for 21 days, in bench scale anaerobic biodigesters, under mesophilic conditions and batch system. Internal pressure of the flasks (biodigesters) was monitored daily and it was converted in volume (daily rate and accumulated). Parameters as pH, chemical organic demand (COD) and moisture content were measured considering three treatments (vinasse, bagasse and vinasse plus bagasse) to relate them to the biogas production. Vinasse digestion and codigestion of vinasse and sugarcane bagasse showed the same volume of accumulated biogas (close to 2.5 mL) throughout the incubation period. Therefore, by the experimental conditions adopted in this study, the two substrates evaluated did not show satisfactory biogas generation potential, even when codigested. Thus, it can be inferred that addition of an inoculum would aid the activation of the biogas generation potential.

KEYWORDS: Biochemical methane potential, Bioenergy, Renewable energy, Sugar-alcohol industry.

INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis é objeto de pesquisa recorrente. Além de se constituírem em recursos não-renováveis e limitados, a produção e uso de combustíveis de origem fóssil estão relacionados à emissão de poluentes atmosféricos. Nesse contexto, os biocombustíveis destacam-se como alternativa de energia mais limpa e renovável, em substituição às fontes de energia convencionais.

Os biocombustíveis compõem o panorama energético do Brasil há mais de 1980 anos; entretanto, o aumento na sua produção ocorreu apenas nos anos 1970, devido à primeira crise do petróleo (BRASIL, 2011). Nessa época, o Programa Nacional do Álcool (Pro-Álcool) regulamentou a mistura de álcool anidro à gasolina e incentivou o aumento na produção de etanol, financiando a ampliação na estrutura das destilarias (VIEIRA et al., 2007). Paralelamente ao crescimento da produção de álcool, houve proporcional aumento na produção de vinhaça, um resíduo (subproduto) proveniente de sua fabricação; a geração de vinhaça pode ser de 10 a 18 litros para cada litro de álcool produzido (SILVA et al., 2007).

A presença de minerais e matéria orgânica destaca o uso da vinhaça como fertilizante agrícola (NASCIMENTO, 2003). Por conter elementos como potássio, nitrogênio e água para o solo, o uso da vinhaça pode economizar até U\$ 75 por hectare fertirrigado (ROSSETTO, 2004). Porém, esses mesmos compostos, quando percolados ou lixiviados, podem causar alterações nas propriedades físico-químicas do solo, com risco de contaminação para os lençóis freáticos (BAFFA et al., 2009). Assim, o potencial fertilizante da vinhaça conflita com os problemas do seu despejo in natura no solo.

Algumas alternativas de tratamento desse efluente têm sido avaliadas, sendo a biodigestão anaeróbia uma das mais interessantes formas de redução de carga orgânica. O uso da biodigestão anaeróbia no tratamento da vinhaça é viável a partir de um biodigestor; esse tipo de tratamento do efluente é capaz de gerar biogás que, por sua vez, possui em sua composição alta concentração de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) (PINTO, 1999). O metano é o principal componente do biogás, podendo atingir concentrações de 55 a 70%; ao passo que o dióxido de carbono compõe uma parcela de 30 a 45% do biogás que pode, ainda, apresentar outros gases em concentrações em nível de traço (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

Assim como a vinhaça, o bagaço também é um subproduto gerado em grande escala na indústria

sucroalcooleira; para cada tonelada de cana são produzidos 84 litros de etanol e 250 kg de bagaço com 50% de umidade (ANDREOLI, 2008). Do poder calorífico contido em uma tonelada de cana, há 392.000 kcal em 70 L de etanol, 560.000 kcal em 250 kg de bagaço úmido e 60.000 kcal em 11.830 L de biogás, com 65% de CH₄.

A partir desses dados, Cortez et al. (1992) fazem uma abordagem da importância do uso dos subprodutos da cana de açúcar para um melhor aproveitamento energético. O destino mais comum do bagaço dentro da própria usina é a caldeira, para a produção de vapor e energia elétrica, o que dá certa independência energética para as indústrias produtoras durante a safra (PIACENTE, 2005).

Segundo Brito (2011), para melhor usufruir do potencial energético do bagaço de cana, pode ser realizado o processo de biodigestão anaeróbia. Segundo Souza (1984), existem variáveis que devem ser controladas no processo de biodigestão anaeróbia: (i) controle de pH, temperatura, alcalinidade e sobrecarga tóxica são essências, pois influenciam diretamente a população de bactérias envolvidas no processo; (ii) a concentração de matéria orgânica deve ser observada pois, a partir dela, é possível analisar o rendimento da geração de biogás em relação ao consumo de matéria orgânica no processo.

Mata-Alvarez et al. (2014) afirmam que a monodigestão pode apresentar algumas desvantagens de acordo com as propriedades dos substratos escolhidos. Assim, o uso da codigestão é sugerido por Alvarez et al. (2009), que definem a codigestão como o ensaio anaeróbio composto por mistura de ao menos dois tipos diferentes de substratos buscando aumentar a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia. Ainda, segundo Mata-Alvarez et al. (2000), a codigestão é uma opção interessante para melhorar o rendimento anaeróbio, ou seja, o uso de um co-substrato na maioria dos casos melhora a produção de biogás devido ao fornecimento de nutrientes até então ausentes no meio.

Algumas formas de reuso do biogás, dentro da própria indústria, são citadas por Granato & Silva (2002): acionamento do mecanismo de moagem da cana a partir do vapor gerado pela sua queima na caldeira; purificação do biogás para obtenção de metano que pode servir como combustível na época de safra; geração de energia elétrica a partir do acionamento de uma turbina ligada a um gerador elétrico. Entretanto, as vantagens da biodigestão anaeróbia não se limitam apenas à produção de biogás.

O processo de biodigestão da vinhaça conserva as propriedades fertilizantes do efluente e minimiza seu potencial de poluição dos solos e mananciais por

apresentar aumento do pH e redução de aproximadamente 90% da DQO durante o tratamento (PINTO, 1999).

Segundo Burke (2001), a biodigestão anaeróbia apresenta muitas vantagens principalmente na área ambiental, já que o uso da biodigestão pode também apresentar resultados com o mercado de créditos de créditos de carbono. Os projetos que envolvem biodigestores se adequam no programa American Carbon Registry (ACR) do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL); por sua vez, o MDL tem como objetivo reduzir a taxa de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa (CGEE, 2010).

Os parâmetros utilizados para determinar a taxa de estabilização de matéria orgânica podem incluir, dentre outros parâmetros, a razão celulose-lignina (C/L), pH, sólidos voláteis (SV, amplamente utilizado pela rapidez e baixo custo) e o potencial bioquímico de metano (*Biochemical Methane Potential – BMP*) (KELLY et al., 2006). O potencial bioquímico de metano (BMP) é uma medida da biodegradação de uma amostra, mede a produção de metano a partir da biodegradabilidade do resíduo (OWEN et al., 1979) e tem sido muito utilizado para esse fim. Para Angelidaki et al. (2009), o teste de BMP resulta na determinação do metano a partir de uma dada massa de substrato. Além de determinar o potencial de metano, baixo custo, reproduzibilidade e a facilidade na instalação são algumas das vantagens da realização do ensaio BMP (LUNA DEL RISCO, 2011; SCHIRMER et al., 2014).

Nesse contexto, o presente trabalho analisou o potencial de geração de biogás a partir da biodigestão da vinhaça, bagaço de cana e sua codigestão, em reatores de bancada próprios à determinação do potencial bioquímico de geração de metano (BMP).

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização físico-química do substrato (vinhaça, bagaço)

A vinhaça e o bagaço utilizados neste estudo foram coletados na empresa Clarion, na cidade de Ibaiti - PR. A vinhaça foi coletada na saída da coluna de destilação e armazenada em uma bombona plástica de 20 L; enquanto o bagaço foi coletado no último terno da moenda e acondicionado em sacos plásticos devidamente vedados.

Os resíduos passaram por alguns procedimentos prévios visando melhorar a cinética das reações e a eficiência da produção de biogás (o bagaço foi triturado e,

no caso da vinhaça, foi necessário um processo de decantação para se obter um resíduo mais concentrado). Todos os ensaios foram realizados em triplicata. Três tratamentos de vinhaça e bagaço foram avaliados:

- I. Vinhaça;
- II. Solução com bagaço triturado; e
- III. Solução vinhaça + bagaço triturado.

Após a separação e preparo dos substratos, os resíduos foram secos em estufa a 110°C durante 48 horas para que posteriormente todos recebessem a quantidade necessária de água, de modo que a umidade final em todos os tratamentos fosse a mesma, 85% (altos teores de umidade do substrato corroboram para a geração de biogás).

Os parâmetros controlados nos três tratamentos foram: pH, demanda química de oxigênio (DQO) e umidade. Segundo Crovador (2014), esses parâmetros estão entre os que apresentam maior influência na geração de biogás durante a biodigestão de resíduos orgânicos. O monitoramento foi feito no início e final do processo, visto que os ensaios foram realizados em batelada. As análises foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

O pH inicial foi aferido por meio de um pH-metro digital, o qual indicou pH de 5,3, apontando a necessidade de adição de hidróxido de sódio (NaOH) para a neutralização do meio (pH final dos tratamentos foi 7,1).

Ensaio BMP: Preparo e *start up* dos biodigestores de bancada

Os biodigestores consistiram de frascos de borossilicato com capacidade de 250 mL (Figura 1), vedados com tampas equipadas com registros e manômetros, para descarga e monitoramento do biogás. Em cada frasco do tratamento (I) foram colocados 34 mL de vinhaça; no tratamento (II), 34 mL da solução aquosa de bagaço triturado e; no tratamento (III), 17 mL de vinhaça foram misturados com 17 mL de solução aquosa de bagaço triturado. Assim, em todos os três tratamentos, o teor de umidade final foi de 85%.

Após selar os biodigestores, a fim de garantir a condição de anaerobiose, circulou-se uma corrente N₂ no *headspace* de cada biodigestor durante 5 min. Em seguida, os manômetros foram acoplados às tampas e os biodigestores foram colocados em banho-maria com temperatura constante de 36°C. Khalid et al. (2011) afirmam que temperaturas entre 35 e 37°C favorecem a produção de metano, pois estimulam o crescimento de

bactérias mesofílicas. Os tratamentos permaneceram incubados até que não se observasse mais geração de biogás, o que ocorreu após o 21º dia de incubação.



Figura 1. Biogestores utilizados no processo de biogestão dos substratos avaliados.

Monitoramento da geração de biogás

O gás acumulado no *headspace* dos frascos foi monitorado constantemente, a fim de observar a geração de biogás por meio da pressão indicada nos manômetros. Para a obtenção do volume de biogás gerado em cada frasco, foram controladas diariamente: temperatura (constante, em 36°C), pressão manométrica (a partir dos manômetros acoplados aos biogestores) e pressão atmosférica local (município de Irati-PR), por meio do site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). A partir desses dados, a pressão dos frascos foi convertida em volume de biogás gerado em cada biogestor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os parâmetros que foram monitorados no ensaio, como umidade, pH e demanda química de oxigênio (DQO), todos controlados antes e depois do período de biogestão.

Tabela 1. Parâmetros analisados antes e depois da biogestão

Parâmetro	Pré-ensaio	Pós-ensaio	Redução
Temperatura (°C)	36	36	-
Umidade	85%	85%	-
pH	7,1	7,0	0,1
DQO (vinhaça) (mg.L ⁻¹)	44555,97 ±401,5	15241,67 ±596,5	65,8%

A temperatura é a variável que apresenta maior influência sobre o metabolismo dos microrganismos responsáveis pela geração de metano (WESTERMANN & AHRING, 1987). Devido a isso, a temperatura foi mantida constante em 36°C durante todo o experimento.

Segundo Andreoli et al. (2003), resíduos que contém teor de umidade entre 60 e 90% apresentam maior potencial de geração de biogás. De fato, Silvestre (2015) afirma que a produção de biogás pode ser afetada diretamente pela umidade que o resíduo apresenta. Os valores de umidade utilizados neste trabalho foram de 85%, valor que se encontra dentro da faixa apresentada na literatura como ótima para geração de biogás.

O pH inicial foi de 7,1 para todos os tratamentos, esse valor está dentro da faixa favorável à geração de biogás. Segundo Manonmani et al. (2017), o pH neutro é favorável à produção de biogás, uma vez que a maioria dos metanógenos cresce na faixa de pH de 6,7 a 7,5. Crovador (2014), em experimento similar usando resíduo de aterro sanitário com inóculo de lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE), realizou a análise do pH em um dos reatores no oitavo dia de ensaio, verificando assim acidificação do meio no início da biogestão; porém, verificou também que ao final dos 91 dias do seu experimento o pH reestabeleceu-se próximo à neutralidade, fato que também ocorreu no presente estudo após os 21 dias de tratamento.

Schirmer et al. (2014) analisaram a geração de metano a partir da fração orgânica de resíduos de aterro sanitário inoculados com lodo de ETE, observando uma redução média na DQO de 90% (considerando todos os ensaios). Segundo Zhang et al. (2008), a DQO solúvel do meio representa a matéria orgânica solúvel, substrato da etapa de metanogênese. Assim, os 65% observados na redução da DQO no presente estudo podem ser atribuídos à conversão da matéria orgânica em biogás.

Monitoramento da geração de biogás

A taxa média de geração diária e o valor de biogás acumulado são apresentados na Figura 2. Os dados referentes à biogestão da vinhaça e codigestão vinhaça+bagaço representam as médias das triplicatas; já no ensaio contendo somente o bagaço, a média foi feita a partir de duplicata, devido ao vazamento de um biogestor.

O Tratamento I (com vinhaça) apresentou pico de geração nos primeiros quatro dias de biogestão. Nesse período, alcançou o valor máximo de produção diária média de biogás de 0,737 mL/g_{res.seco}. O valor acumulado

de biogás para esse tratamento ao final dos 21 dias de experimento foi de 2,46 mL. A quantidade de vinhaça presente no biodigestor está diretamente ligada ao volume de biogás produzido.

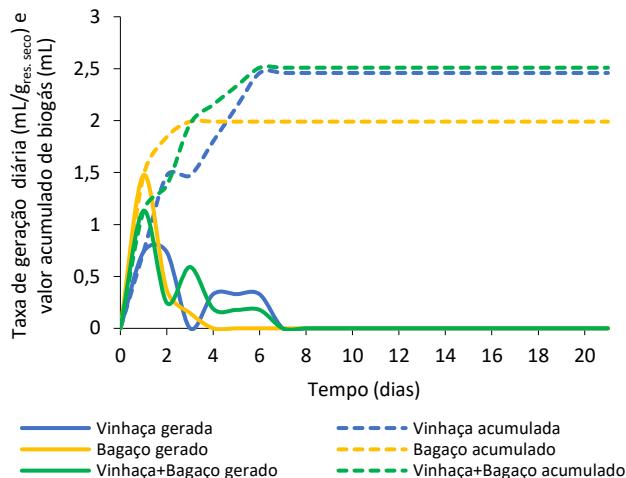


Figura 2. Taxa de geração diária (mL/g_{res.seco}) e o valor acumulado de biogás (mL).

Santos et al. (2014), em experimento utilizando lodo de esgoto como inóculo para a biodigestão da vinhaça, comprovaram que a produção máxima de biogás foi atingida rapidamente nos primeiros dias e não se manteve constante devido à baixa quantidade de vinhaça no tratamento. Isto comprova que o inóculo é importante para a produção de biogás, porém, se a quantidade de resíduo for pequena, a geração de biogás não se prolongará.

O ensaio de biodigestão do bagaço (Tratamento II) apresentou, no primeiro dia de incubação, a taxa máxima de produção diária de 1,48 mL/g_{res.seco}, sendo que o valor médio acumulado ao final dos 21 dias foi de 1,99 mL. Segundo Brito (2011), o bagaço não possui componentes nutritivos que garantam a sua biodigestão anaeróbia, por isso recomenda-se a adição de nutrientes que favoreçam o processo.

Brito (2011) ainda afirma que o substrato bagaço da cana de açúcar apresenta baixo percentual de matéria orgânica que pode ser biodigerida, por isso ainda destaca que é de grande importância existir uma otimização no processo, bem como a inserção de um pré-tratamento no bagaço com o objetivo de aumentar a capacidade de degradação das fibras. O processo hidrotérmico com posterior adição de NaOH realizado por Chandra et al. (2012), é um ótimo método para realizar o pré-tratamento de biomassa rica em lignina e celulose (palha de arroz, bagaço de cana) e assim otimizar a geração de biogás.

Na codigestão da vinhaça e bagaço (Tratamento III), a média do valor máximo da taxa geração diária foi de 1,13 mL/g_{res.seco}, alcançada no primeiro dia do ensaio. A média de biogás acumulado foi de 2,51 mL no encerramento da codigestão. Do ponto de vista econômico, o uso da codigestão é interessante, pois com ela pode-se equilibrar os macronutrientes dos substratos da cana de açúcar sem a necessidade de fazer uso de outros reagentes.

Porém, a codigestão da vinhaça com resíduos ricos em lignina e celulose, como é o caso do bagaço, pode acarretar na produção em excesso de ácido sulfídrico (H₂S) (JANKE et al., 2015). Segundo Salomon (2007), o H₂S, além de ser perigoso ao ambiente por apresentar características tóxicas e corrosivas, pode inibir o processo de biodigestão anaeróbia. É sabido que a presença de agentes inibidores pode ocasionar baixa produção de biogás, o que inclui amônia, sulfeto, metais pesados, etc. (KARHADKAR et al., 1987; CHEN et al., 2008; SILES et al., 2010; RAJAGOPAL et al., 2013; CHEN et al., 2014).

A baixa produção de biogás no presente trabalho pode estar relacionada à falta de um inóculo no processo, visto que nas condições adotadas no presente estudo, a codigestão utilizando vinhaça e bagaço não se mostrou eficiente no aumento da taxa de geração de biogás. A ineficiência da codigestão pode estar relacionada ao que Álvarez et al. (2009) afirmam, que é necessário determinar a proporção correta da mistura na codigestão para potencializar a produção de metano; além disso, deve-se evitar a formação de agentes inibidores do processo.

A ausência de um inóculo no ensaio pode ter sido um fator determinante para a taxa de geração de biogás. De fato, segundo Oliveira et al. (2012), é indispensável o uso de um inóculo para se ter um tratamento anaeróbio eficiente. O inóculo funciona como catalisador da reação, acelerando o processo de decomposição da matéria orgânica e, consequentemente, reduzindo o tempo necessário para geração de biogás. Para contribuir com o bom funcionamento da biodigestão anaeróbia, o inóculo deve apresentar quantidade considerável de biomassa (SILVA, 2012).

Além da falta de um inóculo, a correção de pH utilizando hidróxido de sódio também pode ter influenciado a baixa produção de biogás. Rizk (2009) cita em seu trabalho que, quando fazemos uso dessa solução alcalinizante na vinhaça, podemos alterar o seu potencial de geração de biogás, devido ao fato de os microrganismos presentes no resíduo serem afetados quando entram em contato com o sódio presente na solução usada para regular o pH.

CONCLUSÕES

Devido à dificuldade de se controlar alguns fatores (umidade, pH e temperatura) *in loco*, vários estudos estão sendo realizados em escala de laboratório com o objetivo de quantificar e otimizar a geração de biogás e remoção de carga orgânica de resíduos, como o bagaço e a vinhaça. Nesse contexto, o teste BMP apresenta-se como uma opção simples, de fácil controle das variáveis do processo e com gastos operacionais bastante reduzidos.

Os três tratamentos realizados neste trabalho apresentaram características distintas; a composição de cada um de seus componentes contribuiu para isso. Consequentemente, a produção de biogás apresentou padrões diferenciados em todos os tratamentos ao longo do período de incubação. Quanto à remoção de carga orgânica, os testes mostraram-se uma boa alternativa para o tratamento e disposição da vinhaça, visto que a eficiente redução de carga orgânica na vinhaça biodigerida evidencia a transformação de matéria orgânica em biogás.

Quanto ao potencial de geração de biogás, os Tratamentos I e III (biodigestão da vinhaça e codigestão de vinhaça e bagaço, respectivamente) apresentaram praticamente o mesmo volume de biogás gerado (0,5 mL maior que o Tratamento II, contendo apenas o bagaço). Esses valores revelaram que, pelo menos nas condições adotadas no presente estudo, os dois substratos não mostraram potencial de geração de biogás satisfatório, mesmo quando codigeridos. A adição de um inóculo poderia servir para ativar o potencial de geração de biogás.

O biogás, produto dos ensaios com vinhaça e bagaço, pode apresentar poder calorífico elevado (caso os teores de metano sejam consideráveis em sua composição), e seu tratamento (para remoção de compostos sulfurados, por exemplo) poderia aumentar ainda mais seu potencial energético aproximando-se, inclusive, das características do gás natural. Nesse cenário, o biogás se destaca principalmente por se tratar de uma fonte renovável e com alto potencial energético.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária, pelo apoio financeiro, e à empresa Clarion, pelo fornecimento dos resíduos analisados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ, J. A.; OTERO, L.; LEMA, J. M. A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 4, p. 1153-1158, 2010.

ANDREOLI, C.; FERREIRA, A.; CHERNICHARO, C.; BORGES, E. S. M; Secagem e higienização de lodos com aproveitamento do biogás. In: CASSINI, S. T. (Ed.), *Digestão de resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás*. Rio de Janeiro: ABES, Rima, Rio de Janeiro, 2003. p. 121-165.

ANDREOLI, C. Convergência de agricultura e energia: produção de biomassa celulósica para biocombustíveis e eletricidade. *Economia e Energia*, n. 66, p. 3-13, 2008.

ANGELIDAKI, I.; ALVES, M.; BOLZONELLA, D.; BORZACCONI, L.; CAMPOS, J. L.; GUWY, A. J.; KALYUZHNYI, S.; JENICEK, P.; VAN LIER, J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20. ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 1998.

BAFFA, D. C. F.; FREITAS, R. G.; BRASIL, R. P. C. *O uso da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar*. Ituverava: Nucleus, 2009.

BRASIL. *Biocombustíveis*, 2011. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/11/biocombustiveis>>. Acesso em: 20/10/2016.

BRITO, F. L. S. *Biodigestão anaeróbia em duplo estágio do bagaço de cana-de-açúcar para obtenção de biogás*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

BURKE, P. E. D. A. *Options for recovering beneficial products from dairy manure*. Olympia: Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook, 2001. 54 p.

CHANDRA, R.; TAKEUCHI, H.; HASEGAWA, T. Hydrothermal pretreatment of rice straw biomass: A potential and promising method for enhanced methane production. *Applied Energy*, v. 94, p. 129-140, 2012.

CHEN, J. L.; ORTIZ, R.; STEELE, T. W. J.; STUCKEY, D. C. Toxicants inhibiting anaerobic digestion: a review. *Biotechnology Advances*, v. 32, n. 8, p. 1523-1534, 2014.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, 2008.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Manual de capacitação sobre mudança climática e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)*. Brasília, 2010.

CORTEZ, L.; MAGALHAES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. *Sociedade Brasileira de Planejamento Energético Revista Brasileira de Energia*, v. 2, n. 2, p. 1-17, 1992.

CROVADOR, M. I. C. *Potencial de geração de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos*. 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual

do Centro-Oeste, 2014.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources**. WILEY-VCH Verlag GmbH e Co. KGaA, 2008. 443 p.

GRANATO, E. F.; SILVA, C. L. Geração de energia elétrica a partir do resíduo vinhaça. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 4., **Anais...** Campinas, p. 1-6, 2002.

JANKE, L.; LEITE, A.; NIKOLAUSZ, M.; SCHMIDT, T.; LIEBETRAU, J.; NELLES, M.; STINNER, W. Biogas production from sugarcane waste: assessment on kinetic challenges for process designing. In: International Journal Molecular Sciences, 16., **Anais...** p. 20685-20703, 2015.

KARHADKAR, P. P.; AUDIC, J. M.; FAUP, G. M.; KHANNA, P. Sulfide and sulfate inhibition of methanogenesis. **Water Research**, v. 21, n. 9, p. 1061-1066, 1987.

KELLY, R. J.; SHEARER, B. D.; KIM, J.; GOLDSMITH, C. D.; HATER, G. R.; NOVAK, J. T. Relationships between analytical methods utilized as tools in the evaluation of landfill waste stability. **Waste Management**, v. 26, n. 12, p. 1349-1356, 2006.

KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON, L. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v. 31, n. 8, p. 1737-1744, 2011.

LUNA DEL RISCO, M. A. **Biochemical methane potential of Estonian substrates and evaluation of some inhibitors of anaerobic digestion**. 2011. 124 f. Tese (Doutorado) – Estonian University of Life Sciences, 2011.

MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; ROMERO-GÜIZA, M.S.; FONOLL, X.; PECES, M.; ASTALS, S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412-427, 2014.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 1, p. 3-16, 2000.

MANONMANI, P.; MUAZU, L.; KAMARAJ, M. C.; GOEL, M.; ELANGOMATHAVAN, R. Biogas production potential of food waste. **International Journal of Environment Agriculture and Biotechnology**, v. 2, n. 2, p. 707-711, 2017.

NASCIMENTO, C. L. **Avaliação econômica do aproveitamento do vinhoto concentrado como fertilizante**. 2003. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2003.

OLIVEIRA, M. C. R.; MARRIEL, I. E.; PAIVA, C. A. O.; CALAZANS, G. M.; CRUZ, J. C. Concentração de inóculo e produção de biogás em reator de batelada alimentado com água residuária de suinocultura. **Boletim de Pesquisa e desenvolvimento**, v. 48, p. 1-22, 2012.

OWEN, W. F.; STUCKEY, D. C.; HEALY JR., J. B.; YOUNG, L. Y.; McCARTY, P. L. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. **Water Research**, v. 13, n. 6, p. 485-492, 1979.

PIACENTE, F. J. **Agroindústria canavieira e o sistema de gestão**

ambiental: o caso das usinas localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. 2005. 177 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) – Universidade de Campinas, Campinas, 2005.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. 1999. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

RAJAGOPAL, R.; MASSÉ, D. I.; SINGH, G. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. **Bioresource Technology**, v. 143, p. 632-641, 2013.

RIZK, M. C. **Tratamento de resíduos frutihortícolas**. 2009. 131 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

ROSSETTO, R. A cultura da cana, da degradação à conservação. **Visão Agrícola**, v. 1, n. 1, p. 80-85, 2004.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. 219 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SANTOS, T. N.; MEDEIROS, N. V. S.; MENEZES, R. S. C. Proporção de inóculo para biodigestão anaeróbia de vinhaça - adequação de pH. **Ciência & Tecnologia, Jaboticabal**, v. 6, p. 73-78, 2014.

SCHIRMER, W. N.; JUCÁ, J. F. T.; SCHULER, A. R. P.; HOLANDA, S.; JESUS, L. L. Methane production in anaerobic digestion of organic waste from Recife (Brazil) Landfill: evaluation in refuse of different ages. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 2, p. 373-384, 2014.

SILES, J. A.; BREKELMANS, J.; MARTÍN, M. A.; CHICA, A. F.; MARTÍN, A. Impact of ammonia and sulphate concentration on thermophilic anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 23, p. 9040-9048, 2010.

SILVA, G. A. **Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa através do teste BMP**. 2012. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

SILVA, M. A. S.; 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, p. 108-114, 2007.

SILVESTRE, V. V. **Levantamento do potencial de geração de biogás de aterro sanitário para aproveitamento sob a forma de energia elétrica**. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SOUZA, M. E. Fatores que influenciam na digestão anaeróbia, **Revista DAE**, v. 44, n. 137, p. 88-94, 1984.

VIEIRA, M. C. A.; LIMA, J. F.; BRAGA, N. M. **Setor sucroalcooleiro brasileiro: evolução e perspectivas**. 2007. Disponível em: <http://www.bnDES.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/liv_perspectivas/07.pdf>. Acesso em: 14/11/2016.

WESTERMANN, P.; AHRING, B. K. Dynamics of methane production, sulfate reduction, and denitrification in a permanently waterlogged alder swamp. **Applied and environmental microbiology**, v. 53, n. 37, p. 2554-2559, 1987.

ZHANG, P.; ZENG, G.; ZHANG, G.; LI, Y.; ZHANG, B.; FAN, M. Anaerobic co-digestion of biosolids and organic fraction of municipal solid waste by sequencing batch process. **Fuel Processing Technology**, v. 89, n. 4, p. 485-489, 2008.

Recebido em 25/10/2017

Aceito em 08/12/2017