

Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso

Anaerobic digestion of vinasse: energetic application of biogas and acquisition of credits of carbon – a case

Mariani Silvia Ester Szymanski^{1*}; Rafaelo Balbinot²; Waldir Nagel Schirmer³

Resumo

A crescente produção de etanol no Brasil acarretou aumento na produção de vinhaça (principal subproduto da indústria sucroalcooleira), agravando o problema de sua destinação. A vinhaça é rica em nutrientes minerais e apresenta elevado teor de matéria orgânica, o que justifica sua intensa utilização na fertirrigação de áreas cultivadas com cana. Neste cenário, a biodigestão anaeróbia da vinhaça em reatores UASB (upflow anaerobic sludge blanket digestion) surge como uma alternativa de tratamento deste subproduto apresentando, ainda, um fator econômico: a produção de metano e seu aproveitamento. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do sistema de digestão anaeróbia da vinhaça em reatores UASB, bem como o aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica e obtenção de créditos de carbono. A estimativa da linha de base foi feita com base no balanço de massa entre o carbono presente na vinhaça e o CO₂ emitido pela degradação aeróbia deste efluente no ambiente. Verificou-se que as emissões de linha de base e da implantação do projeto serão as mesmas, sendo que a adicionalidade é a produção de energia elétrica, uma vez que o biogás é uma fonte renovável de energia. Desta forma, pôde-se concluir que o biogás produzido pela biodigestão anaeróbia apresenta potencial energético competitivo com outras fontes energéticas e que o aproveitamento energético do biogás da vinhaça apresentou adicionalidade. Porém, a comercialização de créditos de carbono não pode ser considerada um atrativo (pelo menos financeiro) na implantação deste tipo de projeto.

Palavras-chave: Biodigestor, etanol, MDL, resíduo sólido, UASB

Abstract

The increase of the ethanol production in Brazil leads to growing of vinasse (main by-product of sugar and alcohol industry), worsening the problem related to its destination. Vinasse is rich in nutrients and has a high content of organic matter, which justifies its intense ferti-irrigation use in sugar cane crop areas. Thus, the anaerobic digestion of vinasse by UASB (upflow anaerobic sludge blanket digestion) reactor emerges as an alternative treatment for this by-product, showing also an economic factor, the production of methane and its use. This work aimed to implement the system of anaerobic digestion of vinasse in UASB reactor and the use of energy generated by biogas. In this way, the design of UASB was based on organic volumetrical load of vinasse. The estimation of the baseline was based on the mass balance between the carbon present in the vinasse and CO₂ emitted by the aerobic degradation of effluent

¹ Eng^a Ambiental graduada pela Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO. E-mail: wanasch@yahoo.com.br

² Eng^o. Florestal graduado pela Universidade Federal de Santa Maria, Doutor em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Paraná, Prof. do Dept^o de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Campus CESNORS, Frederico Westphalen, RS. E-mail: rbalbinot@yahoo.com.br

³ Eng^o. Químico graduado pela Universidade Federal de Santa Catarina, Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina, Prof. do Dept^o de Engenharia Ambiental da UNICENTRO, Campus Irati, PR. E-mail: wanasch@yahoo.com.br

* Autor para correspondência

into the environment. From the compute emissions, it was found that emissions from the baseline and the project implementation would be the same, and additionally it could be occur the production of electricity by biogas. In this way, biogas produced by anaerobic digestion has a competitive energy potential compared to other energy sources and presents additionality; however, carbon credits marked could not be a financial attractive in the development of this type of project.

Key words: Biodigester, ethanol, CDM, solid waste, UASB

Introdução

De acordo com a Cooperativa de Produtores de Cana de Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (COPERSUCAR, 1979), a vinhaça (produzida a partir da fermentação e destilação da cana) é considerada o principal resíduo da fabricação do etanol, não apenas pelo grande volume gerado mas, principalmente, pelo seu elevado potencial poluidor. Para se ter uma idéia da dimensão do resíduo gerado, segundo Theodoro (2005), para cada 1000 t de cana processada, são gerados 360 m³ de vinhaça.

Apesar de apresentar algumas variações em sua composição, em geral, a vinhaça é rica em nutrientes minerais como potássio, cálcio e enxofre, além de apresentar elevado teor de matéria orgânica, com demanda química de oxigênio (DQO) entre 20.000 e 35.000 mg.L⁻¹ e pH variando de 3,7 a 5. Devido a essas características e por apresentar um custo relativamente baixo, a vinhaça vem sendo amplamente utilizada na fertirrigação de áreas cultivadas com cana (BELAI, 2006; LUDOVICE, 1997). No entanto, deve-se utilizá-la com cautela, uma vez que pode contaminar águas subterrâneas e mananciais superficiais, devido à percolação ou arraste de altas concentrações de manganês, ferro, potássio, alumínio, cloreto, matéria orgânica, dentre outros (HASSUDA, REBOUÇAS; CUNHA, 1990).

Neste cenário, a biodigestão anaeróbia da vinhaça surge como uma alternativa de tratamento deste subproduto apresentando, ainda, uma importante consequência econômica: a produção de metano e seu aproveitamento como fonte de energia (CORAZZA, 1996). Essa biodigestão, entretanto, apenas se tornou atrativa a partir do desenvolvimento de reatores de alto desempenho,

com baixo tempo de detenção hidráulica, como é o caso do Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e de Manta de Lodo (UASB), que pode ser amplamente aplicado ao caso da vinhaça (GRANATO, 2003). Admite-se que os sólidos suspensos na vinhaça equivalem, em geral, a menos de 10% dos sólidos totais e que sua carga orgânica corresponda, em média, a 300 g_{DQO}.L⁻¹ (ELIA NETO, 2007; GRANATO, 2003).

Características dos sistemas de biodigestão anaeróbia da vinhaça em reatores UASB

O processo de biodigestão anaeróbia consiste na biodegradação de sua carga orgânica. Este processo gera biogás e biofertilizante com reduzida carga orgânica sem, no entanto, alterar suas propriedades fertilizantes (LAMONICA, 2006).

Desenvolvido na Holanda, os biodigestores UASB (upflow anaerobic sludge blanket digestion) são indicados para o tratamento de efluentes com teor de sólidos de até 2% (CORTEZ et al., 2007). Os reatores UASB são sistemas muito compactos, necessitando de volume reduzido devido à sua elevada concentração de biomassa.

Estes reatores podem apresentar várias configurações, como tanques cilíndricos, quadrados e retangulares. Em todas as configurações, o efluente é bombeado ao topo do reator onde é distribuído na “estrutura de distribuição de vazão”, constituída por uma ou mais caixas distribuidoras de fluxo. Estas caixas são divididas internamente, conduzindo o efluente aos seus compartimentos internos. De cada um destes compartimentos, parte um tubo que conduz o efluente à parte inferior do reator, onde é liberado e inicia seu fluxo ascendente, passando pela manta de lodo e vindo a ser coletado na parte

superior, em vertedores ou tubulações perfuradas. Este é o efluente do reator UASB. O gás que é produzido no compartimento de reação na forma de bolhas é coletado na parte central do separador trifásico (VON SPERLING, 2005).

Como a entrada de matéria orgânica no reator é contínua, a biomassa cresce continuamente. Isso traz a necessidade de remoção periódica de parte da manta de lodo evitando-se, assim, que a biomassa venha a sair juntamente com o efluente. No entanto, a produção de lodo em reatores tipo UASB é muito baixa e de elevada qualidade, podendo ser simplesmente desidratado em leitos de secagem ou em equipamentos mecânicos. A retirada do lodo é feita na parte lateral do reator, próximo ao fundo, em diferentes níveis (VON SPERLING, 2005).

Por ser um processo anaeróbio, ocorre a formação de gases com odor desagradável (sulfurados). No entanto, se o projeto for bem elaborado e o reator bem vedado, incluindo a saída do efluente, a liberação destes odores é bastante minimizada. Segundo Von Sperling (2005), a eficiência de remoção da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) do reator UASB situa-se em média em 70% (para esgoto sanitário).

De um modo geral, a biodigestão anaeróbia da vinhaça apresenta como benefícios, por exemplo, um menor consumo de energia (comparativamente a outros sistemas aeróbios); menor produção de lodo em virtude da menor produção de biomassa; possibilidade de aproveitamento do biogás gerado; redução da carga orgânica da vinhaça para sua aplicação no solo, etc. (CORTEZ et al., 2007; SALOMON, 2007; BANCOR, 2007). Como desvantagens, Cortez et al. (2007) citam o maior tempo de detenção, em comparação com sistemas aeróbios e a produção de gases com odor desagradável e corrosivos.

Aplicações dos produtos da biodigestão

A biodigestão anaeróbia da vinhaça resulta na formação de dois produtos: a vinhaça biodigerida e

o biogás. Com relação ao biogás, devido à elevada concentração de metano aí presente, as principais aplicações referem-se à geração de energia (pelo seu potencial combustível). O poder calorífico do biogás se situa em torno de 5.000 a 7.000 kcal.m⁻³; entretanto, este potencial pode atingir 12.000 kcal.m⁻³ caso o CO₂ seja retirado da mistura (CORTEZ et al., 2007).

Na indústria sucroalcooleira, as opções para o aproveitamento do biogás são as seguintes (GRANATO, 2003):

- queimar, em sua totalidade, na caldeira para geração de vapor e acionamento da moagem da cana;
- utilizar parte do biogás em substituição aos combustíveis utilizados na agroindústria durante o período da safra (dentro dos limites da usina);
- utilizar a totalidade do biogás para acionar uma turbina a gás, conjugada a um gerador elétrico.

Geração de energia elétrica a partir do biogás

Para o cálculo da geração de energia, torna-se necessário determinar a eficiência do sistema, que depende da tecnologia utilizada na conversão do biogás. Basicamente, consideram-se três diferentes tecnologias: turbinas à gás, microturbinas e motores ciclo Otto (MOREIRA et al., 2006).

Considerando-se que a vinhaça produzida a partir de uma tonelada de cana moída (1 m³), após passar pelo processo de biodigestão, apresenta 7,2 kg de metano (poder calorífico de 50 MJ.kg⁻¹), obtém-se um total de 100 kWh.t_{cana}⁻¹ (SOUZA et al., 2007).

Segundo Costa (2006), pode-se definir conversão energética como o processo que transforma um tipo de energia em outro. Quando se trata do biogás, submetendo-o a um processo de combustão controlada, a energia química é convertida em energia mecânica, a qual ativa um alternador que a converte

em energia elétrica. As tecnologias mais utilizadas neste tipo de conversão são as microturbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo Ciclo-Otto. Ainda segundo Costa (2006), destacam-se como vantagens da geração de energia elétrica a partir do biogás:

- estratégicas: geração descentralizada próxima ao ponto de carga;
- econômicas: utilização de combustível disponível no local e de baixo custo (resíduo de processo).

O aproveitamento da vinhaça na obtenção de créditos de carbono

O Protocolo de Quioto prevê três mecanismos de flexibilização para ajudar os países do Anexo-I (que assumiram o compromisso de reduzir as emissões dos gases do efeito estufa – GEE) a alcançarem suas metas definidas de redução. São eles: Comércio de Emissões, Implementação Conjunta e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL). Para o caso brasileiro são de grande importância os projetos de MDL, o único aplicável ao Brasil, uma vez que o país não está incluso nos chamados países do Anexo-I, que são aqueles com metas definidas de redução de emissões (PIAN et al., 2009). Assim, os projetos de MDL são realizados em países não-Anexo I (países em desenvolvimento) que, uma vez aplicados, promoverão redução nas emissões de GEE, ou a remoção do CO₂ presente na atmosfera. Os países constantes do Anexo-I, que não conseguirem reduzir suas emissões, poderão comprar créditos de carbono, ou seja, as Reduções Certificadas de Emissões (RCE) de países em desenvolvimento, desde que estes projetos resultem também em desenvolvimento sustentável. Num projeto de MDL, dois parâmetros principais devem ser estimados de forma segura: a Linha de base e a Adicionalidade do projeto. A Linha de base representa as emissões de GEE na ausência do projeto. Um projeto pode ser ou não considerado adicional, desde que possa comprovar que suas emissões antrópicas de CO₂

serão menores do que as que ocorreriam na ausência do projeto. O valor encontrado para a magnitude da adicionalidade é o considerado para a certificação das emissões. Vale destacar também que, para obtenção das RCE, a entidade responsável pelo projeto deve provar que sem os recursos financeiros provenientes da venda dos créditos este, seria economicamente inviável (ROCHA, 2004).

Segundo Araújo (2008) existem, basicamente, duas modalidades de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) consideradas elegíveis, perante as regras estabelecidas no Protocolo de Quioto:

- a primeira refere-se a projetos de substituição de fontes de CO₂ que, no caso do setor energético pode ser a substituição de combustíveis fósseis e/ou aumento de eficiência energética em matrizes poluidoras; ou seja, o uso de tecnologias e sistemas de geração de energia com menor potencial de emissão de gases do efeito estufa (GEE). Como exemplo, pode-se citar a substituição do uso de óleo combustível por biomassa;
- a segunda modalidade refere-se às atividades que visem à remoção e estocagem de CO₂ atmosférico através de sumidouros, em atividades relacionadas ao uso da terra, também conhecidas como atividades de LULUCF (*Land Use, Land Use Change and Forestry*). Nesta modalidade, incluem-se os projetos de florestamento e reflorestamento.

O aproveitamento do gás da vinhaça se encaixa no primeiro item, uma vez que, com sua utilização na geração de energia elétrica, por exemplo, deixa-se de utilizar outras fontes com taxas de emissão de GEE superiores ao biogás. Além disso, esta é uma fonte de energia disponível e renovável.

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a aplicabilidade do sistema de biodigestão anaeróbia da vinhaça em reatores UASB em uma usina sucroalcooleira, bem como o

aproveitamento do biogás gerado na produção de energia elétrica.

Metodologia

Este trabalho foi elaborado de acordo com as características de uma empresa do setor sucroalcooleiro localizada no estado do Paraná. A empresa foi criada objetivando o cumprimento de uma iniciativa tomada pelo Governo Federal, que incentiva a substituição dos combustíveis derivados de petróleo por fontes renováveis, como o álcool, da cana de açúcar. Os dados utilizados neste estudo referem-se à safra de 2007/08.

Dimensionamento do sistema de biodigestão anaeróbia

A metodologia selecionada para dimensionamento do biodigestor UASB foi feita com base em Chernicharo (2007), descrita a seguir:

- *Volume do reator:*
$$V = \frac{S_0 Q}{COV} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde: V: Volume do reator (m³); COV: Carga orgânica volumétrica (Kg_{DQO}.m⁻³.dia⁻¹); Q: Vazão diária de vinhaça (m³.d⁻¹); S₀: carga orgânica inicial (Kg_{DQO}.m⁻³)

Obs.: o valor máximo da COV no reator é de 15 Kg_{DQO}.m⁻³.dia⁻¹.

- *Volume de cada módulo:* Deve-se adotar 2500 m³ como volume máximo em cada módulo.

- *Tempo de detenção hidráulica:*

$$TDH = V / Q \quad (\text{Eq. 2})$$

onde: TDH: Tempo de detenção hidráulica (dias)

- *Velocidade ascendente de fluxo:*

$$v = H / TDH \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: v: Velocidade ascendente de fluxo (m.h⁻¹); H = Altura do reator (m)

- *Área de cada módulo:*

$$A_u = V_u / H \quad (\text{Eq. 4})$$

onde: A_u: Área de cada módulo (m²); V_u = Volume do módulo (m³); H = Altura do reator (m)

- *Largura e comprimento de cada módulo:*

$$L_1 = \sqrt{A} \quad (\text{Eq. 5})$$

onde: L₁: Largura do reator (m)

$$L_{2u} = A / L_1 \quad (\text{Eq. 6})$$

onde: L_{2u}: Comprimento de cada módulo (m)

- *Carga hidráulica volumétrica:*

$$CHV = Q / V \quad (\text{Eq. 7})$$

onde: CHV: Carga Hidráulica Volumétrica (m³.m⁻³.dia⁻¹); Adota-se como CHV máxima 5 m³.m⁻³.dia⁻¹.

- *Carga biológica:*

$$CB = \frac{Q \cdot S_0}{M} \quad (\text{Eq. 8})$$

onde: CB: Carga Biológica (Kg_{DQO}/Kg_{STV}); M: Kg_{STV} presente no lodo do reator (20 kg.m⁻³)

Dimensionamento do sistema de aproveitamento do biogás

Para dimensionamento do sistema de aproveitamento de biogás, a metodologia selecionada foi a sugerida por Lamo (1991):

- *Determinação da carga orgânica:*

$$CO = Q.DQO \quad (\text{Eq. 9})$$

onde: CO: carga orgânica ($\text{kg}_{\text{DQO}}.\text{dia}^{-1}$); Q: vazão diária de vinhaça (m^3); DQO: Demanda química de oxigênio ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$)

- *Produção de biogás pela biodigestão anaeróbia da vinhaça:*

$$PB = CO.E.F \quad (\text{Eq. 10})$$

onde: E: eficiência de remoção de DQO do processo (65%); F: fator de conversão de biogás por DQO removido ($0,45 \text{ Nm}^3.\text{kg}^{-1}$ de DQO removida).

- *Determinação da quantidade de energia do biogás:*

$$GEB = PB.PCIB \quad (\text{Eq. 11})$$

onde: GEB: quantidade de energia contida no biogás ($\text{Kcal}.\text{dia}^{-1}$); PCIB: poder calorífico inferior do biogás ($5.100 \text{ kcal}.\text{Nm}^{-3}$)

- *Estimativa da produção de energia elétrica produzida pela combustão do biogás:*

$$PEEB = GEB.E_1 \quad (\text{Eq. 12})$$

onde: E_1 : eficiência do motor de combustão a gás.

Geração de créditos de carbono

Linha de base

Linha de base de um projeto de MDL pode ser definida como as emissões de GEE anteriores à implantação deste projeto. Sabendo-se que, atualmente, não existe qualquer sistema de tratamento da vinhaça gerada na usina em questão, as emissões de metano da linha de base serão estimadas a partir do volume total de vinhaça produzido pela empresa, considerando sua degradação no ambiente. Desta forma, a estimativa foi feita com base no balanço de massa entre o carbono contido na vinhaça e a geração de CO_2 pela degradação

aeróbia deste efluente no ambiente (Eq. 13), uma vez que não existe metodologia desenvolvida para este equacionamento.

$$ELB = \frac{Q.C_c.R_{\text{CO}_2/\text{C}}}{1000} \quad (\text{Eq. 13})$$

onde: ELB: emissões da linha de base ($\text{t}_{\text{CO}_2}.\text{ano}^{-1}$); Q: vazão de vinhaça ($\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$); C_c : concentração de carbono na vinhaça ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$); $R_{\text{CO}_2/\text{C}}$: relação massa atômica CO_2/C .

Emissões do projeto

A Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudança do Clima (UNFCCC) disponibiliza metodologias aprovadas para a estimativa das emissões decorrentes da implantação de determinados tipos de projetos. No entanto, para determinação das emissões do sistema de biodigestão anaeróbia da vinhaça, bem como do aproveitamento energético do biogás produzido, não existem metodologias desenvolvidas. Desta forma, a estimativa das emissões foi feita com base no balanço de massa entre o carbono contido na vinhaça e as emissões de CO_2 na combustão do biogás.

Resultados e Discussão

Sistema de biodigestão anaeróbia da vinhaça

A partir dos dados obtidos junto à empresa referentes à safra 2007/08 (Tabela 1) e, considerando-se eficiências de remoção de DQO e DBO de 65 e 70%, respectivamente, com carga orgânica volumétrica de $15 \text{ kg}_{\text{DQO}}.\text{m}^{-3}.\text{dia}^{-1}$, obtiveram-se os seguintes valores para o sistema de biodigestão anaeróbia da vinhaça:

- Volume total do reator: 9.216 m^3 ;
- Número de módulos: 6 módulos de 1.536 m^3 , sendo 2 conjuntos de 3 módulos cada;
- Tempo de detenção hidráulica: 2,13 dias ($51,12 \text{ h}$);

- Área do reator: 1.536 m² (256 m² por módulo);
- Largura de cada módulo: 16 m;
- Comprimento de cada módulo: 16 m;
- Sistema de distribuição da vinhaça: 100 tubos por módulo.

Para dimensionamento de sistemas de tratamento para efluentes industriais de elevada carga orgânica, Chernicharo (2007) recomenda que este seja realizado com base na carga orgânica volumétrica (COV) do efluente. No entanto, apesar de satisfeitas as recomendações quanto à carga orgânica aplicada, considerando-se que o lodo a ser inoculado no reator é proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETE), ou seja, não é adaptado às características da vinhaça, recomenda-se que, na partida do reator, sejam aplicadas cargas inferiores àquelas que constam em projeto, com o objetivo de garantir a adaptação da biomassa existente no lodo. Viana (2006), em seu experimento, utilizou COV de 0,73 kg.m⁻³.dia⁻¹.

Tabela 1. Parâmetros utilizados no dimensionamento do sistema de biodigestão.

Parâmetro	Vinhaça
DQO (mg.L ⁻¹)	24.000*
DBO (mg.L ⁻¹)	12.000*
Vazão (m ³ .d ⁻¹)	4.320**

Valores obtidos junto à empresa (safra 2007/2008)

Devido às elevadas temperaturas da vinhaça na saída da destilaria (em torno de 88° C) deve-se planejar um sistema de resfriamento da mesma, o qual pode ser constituído por tanque de equalização ou torres de resfriamento, entre outras tecnologias. Cabe destacar que a redução da temperatura deve ser condicionada pela fase em que será operado o reator UASB (mesofílica ou termofílica). Neste caso, como o lodo inoculado será proveniente de ETE, o qual é adaptado a temperaturas mesofílicas,

recomenda-se a operação do reator nesta fase de temperatura (30 a 40 °C, aproximadamente). Ribas (2007) avaliou a eficiência de remoção de DQO da vinhaça em reatores operados nas fases termofílica e mesofílica, e concluiu que, de fato, as eficiências de remoção são maiores e o tempo de adaptação do inóculo é menor quando o reator é operado na fase mesofílica.

Sistema de aproveitamento do biogás

Para o dimensionamento do sistema de aproveitamento do biogás produzido pela biodigestão anaeróbia, utilizaram-se os parâmetros mencionados na (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros do dimensionamento do sistema de aproveitamento do biogás.

Parâmetro	Vinhaça
DQO (mg.L ⁻¹)	24.000
Vazão (m ³ .d ⁻¹)	4.320

Valores obtidos junto à empresa (safra 2007/2008)

Para estimativa da produção de energia elétrica, utilizou-se uma eficiência de conversão de 35% em motores de combustão interna (COSTA, 2006). De posse desses dados, obtiveram-se os seguintes valores:

- Produção de biogás: 30.326,4 Nm³.d⁻¹;
- Quantidade de energia contida no biogás: 1,55.10⁸ kcal.d⁻¹;
- Produção de energia elétrica diária: 2.624,6 kWh.

Para determinação da quantidade de energia contida no biogás, considerou-se uma concentração média de metano de 65%. Neste caso, de acordo com Santos, Lucas Júnior e Silva (2007), 1 m³ de biogás equivale, em termos de poder calorífico, a 0,6 m³ de gás natural, 0,628 litros de gasolina ou 1,602 kg de lenha seca.

Um fator que merece consideração no momento da escolha da tecnologia para geração de energia elétrica são os níveis de emissão no processo. De acordo com Costa (2006), a taxa de emissão de NO_x em turbinas e microturbinas é significativamente menor em comparação a motores de combustão interna. Sendo assim, a vantagem no uso, principalmente de microturbinas, está vinculado ao ganho ambiental proporcionado pelas menores taxas de emissão de poluentes atmosféricos.

Observando-se a baixa eficiência de conversão de biogás em energia elétrica (em torno de 35% para motores de combustão interna e 26% para microturbinas), outras alternativas para aproveitamento do biogás devem ser analisadas, uma vez que podem maximizar o aproveitamento de sua energia.

Para determinação da quantidade de energia contida no biogás, utiliza-se como parâmetro de cálculo o poder calorífico inferior (PCI) do biogás, o qual é dependente da concentração de CH_4 . Considerando-se que a concentração de CH_4 no biogás é inversamente proporcional à concentração de CO_2 , é de grande importância a concepção de um sistema de purificação com o objetivo de elevar seu poder calorífico e, conseqüentemente, otimizar o processo de conversão energética.

Geração de créditos de carbono

Linha de base

A estimativa das emissões de CO_2 do uso de combustível fóssil para a geração de eletricidade produzida fora do local não foi necessária, pois a empresa é auto-suficiente na produção de eletricidade, utilizando a co-geração com bagaço de cana de açúcar.

Sendo assim, para estimativa da linha de base, foram consideradas as emissões provenientes do armazenamento em lagoa pulmão, distribuição da vinhaça nos canais, sua utilização para irrigação e posterior degradação. Deve-se destacar que,

provavelmente, uma pequena parcela da vinhaça é assimilada pelo ambiente e fixada no solo (humificação); desta forma, ocorre uma redução nos gases emitidos para a atmosfera. Como não existe metodologia desenvolvida para esta estimativa, esta variável foi desconsiderada.

De acordo com Rafaldini et al (2006), a vinhaça apresenta teor de carbono na ordem de 3 kg.m^{-3} . Considerando-se a massa atômica do carbono (12) e relacionando-o com a massa atômica do CO_2 (44), verifica-se que uma molécula de CO_2 apresenta 3,67 vezes a massa de um átomo de carbono. Sendo assim, para estimativa da linha de base utilizaram-se os parâmetros descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para o cálculo da linha de base.

Parâmetro	Valor Adotado
	1.200.960
Teor de C na vinhaça (kg.m^{-3})*	3
Relação peso atômico $\text{CO}_2(44)/\text{C}(12)$	3,67

*Rafaldini et al. (2006)

Nesse caso, as emissões da linha de base totalizaram $13.210,45 \text{ t}_{\text{CO}_2}.\text{ano}^{-1}$ (Equação 13).

Emissões do projeto

As emissões do projeto foram estimadas considerando que parte do carbono presente na vinhaça, quando submetido ao processo de degradação anaeróbia, será metabolizado e o restante permanecerá no efluente, da seguinte forma:

1) carbono metabolizado no reator:

- parte irá compor o biogás: considerando-se que o biogás gerado é composto por, aproximadamente, 40% de CO_2 e 60% de CH_4 e que a combustão do CH_4 será completa, admite-se que todo metano será convertido em CO_2 ao final do processo;

- parte irá se transformar em biomassa: apesar de não estar considerada no cálculo das emissões, o carbono convertido em biomassa microbiana, dentro do reator, será transformado em CO₂ via degradação aeróbia após sua remoção “limpeza do reator”.

2) parcela de carbono que permanece na vinhaça biodigerida: devido à eficiência do reator (remoção de DQO) ser de 65%, o efluente ainda terá considerável carga orgânica. Este efluente será utilizado na fertilização, e o carbono remanescente será convertido em CO₂ a partir da degradação aeróbia.

Assim, todo o carbono que entra no sistema de biodigestão anaeróbia com aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, será emitido na forma de CO₂ ao final de cada processo, totalizando as 13.210,45 t_{CO₂}.ano⁻¹, calculadas anteriormente.

Neste caso, a adicionalidade do projeto se limita à produção de energia elétrica, uma vez que o biogás é uma fonte renovável de energia, que não estava sendo aproveitada, deixando-se de utilizar energia proveniente de outras fontes com maior emissão, como as de combustíveis fósseis. Para a estimativa das emissões evitadas, considerou-se os parâmetros descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros utilizados para o cálculo das emissões reduzidas.

Parâmetro	Valor Adotado
Produção de energia elétrica com biogás (MWh.ano ⁻¹)*	729,64
Fator médio de emissão de CO ₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil (t _{CO₂} .MWh ⁻¹)**	0,451

* Obtido no dimensionamento do sistema de aproveitamento do biogás, considerando-se uma produção diária de 2,625 MWh e 278 dias de safra por ano.

** BRASIL (2008)

O total de emissões evitadas pelo uso do biogás para geração de energia elétrica foi de 329,07 t_{CO₂}.ano⁻¹. Ainda, a energia da cogeração com bagaço de cana está sendo comercializada a R\$ 116,00/MW gerado.

Conclusões

O sistema de biodigestão proposto mostrou-se uma opção para o aproveitamento e tratamento da vinhaça uma vez que, além dos ganhos ambientais de redução de carga orgânica promovidos pelo tratamento, a vinhaça biodigerida pode ainda ser utilizada na fertilização, uma vez que este tratamento não reduz o potencial fertilizante do efluente. No entanto, sugere-se verificar a aplicação de sistemas de tratamento mais compactos, pois o reator projetado apresentou elevadas dimensões.

O biogás produzido pela biodigestão anaeróbia da vinhaça apresenta considerável potencial energético, uma vez que, se submetido a um processo de purificação, seu poder calorífico pode se aproximar daquele observado no gás natural, com a vantagem de o biogás ser um combustível renovável e disponível.

O aproveitamento energético do biogás da vinhaça apresentou adicionalidade, fundamental para obtenção de créditos de carbono. No entanto, o aspecto motivador para implantação deste tipo de projeto deve ser mesmo o ganho ambiental e a produção de energia, visto que a comercialização de créditos de carbono, neste caso, não dará retorno financeiro significativo.

Referências

ARAÚJO, P. D. *O uso energético do hidrogênio produzido por fontes renováveis para a aplicação veicular no contexto do mecanismo de desenvolvimento limpo: estudo de caso na cidade de São Paulo*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- BANCOR International Trading Company. *Tratamento de vinhaças e produção de biogás*. Disponível em: <<http://www.bancor.com.br/vinha%E7a.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2007.
- BELAI, H. T. *Uso de subprodutos da indústria sucroalcooleira no manejo de um neossolo quartzarênico órtico típico*. 2006. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). *Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil*. 2008. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/72764.html>>. Acesso em: 18 nov. 2008.
- CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2007. 379 p.
- COPERSUCAR. *Aproveitamento da vinhaça, viabilidade técnica-econômica*. Piracicaba: Centro de Tecnologia da Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo, 1979.
- CORAZZA, R. I. *Reflexões sobre o papel das políticas ambientais e de ciência e tecnologia na modelagem de opções produtivas 'mais limpas' numa perspectiva evolucionista: um estudo sobre o problema da disposição da vinhaça*. 1996. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- CORTEZ, L. A. B.; SILVA, A.; LUCAS JUNIOR, J. de; JORDAN, R. A.; CASTRO, L. R. de. Biodigestão de efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. (Coord.). *Biomassa para energia*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2007. cap. 15, p. 493-529.
- COSTA, D. F. *Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto*. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ELIANETO, A. Processo, efluentes e resíduos da indústria do etanol. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE ÁGUA SUBTERRÂNEA E ETANOL: DA PRODUÇÃO AO CONSUMO, 1., 2007, São Paulo. *Anais...* São Paulo: AcquaCon, 2007. CD-ROM.
- GRANATO, E. F. *Geração de energia através da biodigestão anaeróbia de vinhaça*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista, Bauru.
- HASSUDA, S.; REBOUÇAS, A. C.; CUNHA, R. C. A. Aspectos qualitativos da infiltração da vinhaça de cana no Aquífero Bauru. *Revista IG*, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 5-20, 1990.
- LAMO, P. de. *Sistema produtor de gás metano através de tratamento de efluentes industriais*. Piracicaba: Codistil, 1991.
- LAMONICA, H. M. *Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça*. Campinas: Editora Unicamp, 2006. (Palestra proferida no AGRENER).
- LUDOVICE, M. T. F. *Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático*. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MOREIRA, J. R.; COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. Sewage biogas, production and electric energy generation. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 1., 2006, Rio de Janeiro. *Abstracts...* Rio de Janeiro: IBP, 2006. p. 1489.
- PIAN, L. B.; SCHIRMER, W. N.; BALBINOT, R.; DANCZUK, M. Determinação da linha de base e adicionalidade de um projeto de MDL a partir da emissão de poluentes utilizando diferentes combustíveis. *Estudos Tecnológicos*, São Leopoldo, v. 5, n. 3, p. 270-283, 2009.
- RAFALDINI, M. E.; PISSINATTO, L. B.; MANOEL, R. M.; CHAGAS, P. R. R.; ALMEIDA, R. M. A. Controle biológico para sistemas de aplicação de vinhaça no solo. *Revista Engenharia Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 3, n. 2, p. 041-057, 2006.
- RIBAS, M. M. F. *Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio operado em batelada seqüencial contendo biomassa imobilizada sob condições termofílicas e mesofílicas*. 2007. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ROCHA, M. T. Mudanças climáticas e mercado de carbono. In: SANQUETA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B. (Org.). *Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas*. Curitiba: UFPR, 2004. p. 39-54.
- SALOMON, K. R. *Avaliação técnico-econômica da biodigestão anaeróbia das vinhaças*. Universidade de São Paulo. Trabalho apresentado no II GERA: Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindústria Sucroalcooleira. Pirassununga: [s.n.], 2007.
- SANTOS, T. M. B.; LUCAS JUNIOR, J.; SILVA, F. M. Avaliação do desempenho de um aquecedor para aves adaptado para utilizar biogás como combustível. *Revista Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 658-664, 2007.

SOUZA, M. R.; OLIVERIA, A. A.; TOMÉ, F. B.; MOREIRA, F. R. V.; ANGELIS, L. M. de; PIZETTA, E.; KOZA, S.; PORTOFE, L.; VERONEZZI, G.; VENDRANINI, P. M.; MANZANO, L. F.; CAMARGO, M. *Relatório*: termo de referência – TR8. Geração de eletricidade a partir de biomassa e biogás. São Paulo, 2007. 75 p. Disponível em: <<http://www.saneamento.sp.gov.br/noticias/set-07/TR8%20Relat%C3%B3rio%20-%20Minuta.pdf>>. Acesso em: 31 jul. 2010.

THEODORO, J. M. P. *Considerações sobre os custos ambientais decorrentes do gerenciamento dos resíduos sólidos e dos efluentes industriais gerados no setor sucroalcooleiro*: um estudo de caso. 2005. Dissertação

(Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Centro Universitário de Araraquara, Araraquara.

VIANA, A. B. *Tratamento anaeróbio da vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55° C) e submetido ao aumento progressivo da carga orgânica*. 2006. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

