



Encontro Internacional sobre Gestão
Empresarial e Meio Ambiente

Potencial de geração de energia elétrica pela biodegradação da vinhaça em produtor de cachaça de pequeno porte

REGIS NAKANDAKARI

regisnak@gmail.com

SONIA VALLE WALTER BORGES DE OLIVEIRA

Universidade de São Paulo

soniavw@terra.com.br

ALESSANDRA HENRIQUES FERREIRA

alessandrahf@usp.br

ALEXANDRE BEVILACQUA LEONETI

ableoneti@usp.br

MARCIO MATTOS BORGES DE OLIVEIRA

mmattos@usp.br

Potencial de geração de energia elétrica pela biodegradação da vinhaça em produtor de cachaça de pequeno porte

RESUMO

Considerando-se o cenário produtivo de Cachaça no Brasil, há que se atentar aos impactos ambientais gerados pelos resíduos provenientes desse processo. A vinhaça é altamente poluente e não deve ser descartada em rios ou leitos de água sem tratamento prévio. Uma possibilidade é a utilização da vinhaça como fertilizante e também na produção de biogás. Considerando-se a capacidade instalada de produção de cachaça no Brasil, questiona-se: qual o potencial de geração de energia elétrica a partir da biodigestão anaeróbia de vinhaça proveniente da produção de cachaça de um pequeno produtor? O objetivo foi avaliar o potencial de geração de energia elétrica por meio da biodigestão anaeróbia da vinhaça de um pequeno produtor. A pesquisa se caracteriza como descritiva, aplicada e com uma dimensão exploratória. A execução da pesquisa realizou-se com auxílio de um estudo de caso. Foi observado que, com o dimensionamento do sistema de digestão e o aproveitamento do gás obteve-se um potencial de geração de energia elétrica com a instalação de um reator UASB que excedeu a necessidade da planta. Os resultados da presente pesquisa podem contribuir para a autossuficiência e comercialização do excedente de energia em instalações produtoras de cachaça, com conseqüente minimização dos impactos ambientais causados pela fertirrigação da vinhaça *in natura*.

Palavras-chave: Vinhaça . Biodigestão. UASB. Biogás. Cachaça.

Potential for electricity generation by biodegradation of vinasse in a small Cachaça facility

ABSTRACT

Considering the production of Cachaça in Brazil, it is also important to reflect on environmental impact caused by the waste from this process, which is the vinasse. The vinasse is a highly polluting compound and should not be discarded into rivers or watercourses without prior treatment. A possibility is its use for Biogas production. The objective of the research was to evaluate the potential for power generation by anaerobic digestion of vinasse in a small Cachaça facility. research was carried out with the help of a case study. It was found that, with the use of the gas generated by the digestion system, the electric generation exceeds the need of the UASB reactor. This result may contribute to disseminate the possibility of self-sufficiency and marketing of extra energy in the Cachaça facilities, with consequent minimization of environmental impacts caused by vinasse.

Key Words: Vinasse. Bio-digestion. UASB. Biogas. Cachaça

1 INTRODUÇÃO

A cachaça, uma típica bebida brasileira, surgiu nos engenhos do Brasil Colônia em meados do século XVI. Esse destilado tem apresentado crescimento no consumo tanto no mercado internacional como no nacional. Ocupa atualmente a terceira posição no *ranking* mundial (mercado de destilados) e é o segundo maior mercado de bebidas alcoólicas no Brasil, atrás apenas da cerveja (ABRABE, 2015).

O Instituto Brasileiro da Cachaça (IBRAC), estima que o Brasil possua uma capacidade instalada para a produção de 1,2 bilhão de litros anuais de cachaça, porém produz anualmente menos de 800 milhões de litros (IBRAC, 2015). Em 2014, produziu-se no Brasil aproximadamente 470 milhões de litros de cachaça (SICOBÉ, 2015).

De acordo com dados do censo agropecuário, realizado em 2006 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), são 11.124 produtores de cachaça no país, que produziram 105.376 L¹ com um faturamento de R\$ 135 mil² (IBGE, 2012). Deste total, de acordo com o IBRAC (2015), menos de 2 mil estabelecimentos estão devidamente cadastrados no Ministério da Agricultura e Receita Federal, totalizando 4000 marcas. Isto indica que 90% da produção está legalizada, mas estima-se que 85% dos produtores sejam informais.

Considerando-se o cenário produtivo de aguardente de cana no Brasil, há que se atentar aos impactos ambientais gerados pelos resíduos provenientes desse processo, independente do porte do produtor, e o mais importante, pesquisar possíveis soluções economicamente viáveis aliadas à preservação do meio ambiente para o reuso de seus subprodutos e minimização dos impactos gerados por eles.

Durante o processo produtivo de aguardente de cana são gerados os seguintes resíduos: ponteira da cana, vinhaça e bagaço. A ponteira de cana pode ser utilizada em silagem para alimentação animal; o bagaço (rico em fibras) pode ser utilizado principalmente como combustível em caldeiras substituindo a utilização da madeira. Já a vinhaça é altamente poluente (devido à sua composição) e não deve ser descartada em rios ou leitos de água sem tratamento prévio, mas pode ser utilizada como fertilizante e também na produção de biogás.

Em geral, a vinhaça é rica em nutrientes minerais como potássio (K), cálcio (Ca) e enxofre (S), 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 (SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010).

Segundo Rego e Hernández (2006), a produção de vinhaça varia em função dos diferentes processos empregados na fabricação do álcool e da cachaça no Brasil. Salomon (2007) afirma que algumas usinas possuem uma produção média de 7 a 10 litros de vinhaça por litro de etanol, outras usinas mantêm uma média de 10 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol. Rodrigues et al. (2012) apresentam a relação de um litro de álcool para 14 litros de vinhaça. Silva et al. (2014) indicam a razão de 10 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol destilado. Levando-se em consideração os valores indicados por vários autores pode-se considerar, em média, que para cada litro de álcool ou cachaça produzido no processo de destilação, gera-se 15 litros de vinhaça.

Devido às suas características e por apresentar um custo relativamente baixo, a vinhaça vem sendo amplamente utilizada na fertirrigação de áreas cultivadas com cana (SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010). Entretanto, Silva, Griebeler e Borges (2007) afirmam que a aplicação de vinhaça tem sido contestada pelos seus efeitos no solo e nas águas subterrâneas, podendo tornar a água do lençol freático impotável, o que sugere o controle da quantidade aplicada de acordo com a área de cultivo, ou o tratamento antes de

¹ Quantidade vendida (1000 litros).

² Valor da produção (R\$ 1000).

utilizada para a fertirrigação.

Uma maneira de tratar a vinhaça é por meio de sua biodigestão anaeróbia. Segundo Lamônica (2006), esse processo consiste na biodegradação de sua carga orgânica, resultando em biogás e biofertilizante com reduzida carga orgânica sem, no entanto, alterar suas propriedades fertilizantes.

Segundo Rodrigues et al. (2012), o biogás é formado por uma mistura de gases, 70% de gás metano, que é um gás combustível substituto do querosene, óleo e outros inflamáveis. O biogás resultante da biodigestão anaeróbia da vinhaça pode ser aproveitado de duas maneiras: a primeira consiste na queima direta, ou seja, utilização em aquecedores, fogões, caldeiras, entre outros; e a segunda seria a conversão do biogás em energia elétrica (REGO; HERNÁNDEZ, 2006).

Na oferta interna de energia elétrica, a energia de fonte hidráulica produzida no Brasil representou 85,6%, constituindo-se, de longe, na maior produtora de eletricidade do país (ANELL, 2008). Embora gerem energia renovável, usinas hidrelétricas de grande porte possuem alto custo de construção e acarretam grandes impactos socioambientais. Portanto, há necessidade de fontes alternativas de geração de energia para um país que apresenta projeções de aumento na demanda energética (REGO; HERNÁNDEZ, 2006).

Considerando-se a crise no setor energético do país e a capacidade instalada de produção de cachaça – pode-se gerar cerca de 18 bilhões de litros de vinhaça (1,2 bilhões/L x 15 L), a questão de pesquisa do presente artigo é: qual o potencial de geração de energia elétrica a partir da biodigestão anaeróbia de vinhaça proveniente da produção de cachaça de um pequeno produtor?

A partir desse questionamento, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar o potencial de geração de energia elétrica por meio da biodigestão anaeróbia da vinhaça de um produtor de pequeno porte. Os objetivos específicos foram: dimensionar o sistema de biodigestão anaeróbia; avaliar o potencial de geração de biogás por meio da biodigestão anaeróbia da vinhaça em reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB); avaliar a capacidade de geração de energia elétrica a partir da quantidade de vinhaça gerada na produção de cachaça.

Os resultados da presente pesquisa podem contribuir para a autossuficiência e comercialização do excedente de energia em instalações produtoras de cachaça, com consequente minimização dos impactos ambientais causados pela fertirrigação da vinhaça *in natura*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente referencial teórico é composto pelos temas relacionados ao aproveitamento energético da vinhaça proveniente da destilação da cachaça, englobando aspectos da produção de cachaça, geração de vinhaça, tratamento biológico anaeróbio em reatores UASB e cálculos necessários para o dimensionamento do sistema.

2.1 Cachaça e vinhaça: aspectos gerais

A produção da cachaça inicia-se com a obtenção do caldo da cana-de-açúcar extraído por meio do processo de moagem. Extraído o caldo, este é filtrado e decantado para a eliminação das impurezas. A condição ideal para o processo de fermentação ocorre quando a concentração de açúcares é de 15° Brix (% de sólidos solúveis). Logo, a próxima etapa é a correção do grau Brix, uma vez que normalmente o caldo apresenta concentrações entre 14° e 22° Brix. Corrigida a concentração de açúcares, inicia-se o processo de fermentação que vai gerar o vinho. A vinhaça de alambique é proveniente do mosto formado a partir da mistura do caldo da cana-de-açúcar e da água adicionada no processo de diluição deste (VENTURINI FILHO; NOGUEIRA, 2013).

A vinhaça caracteriza-se por ser um líquido de odor forte, coloração marrom-escuro,

baixo pH, alto teor de potássio e com alta DQO, ou seja, com alta carga de matéria orgânica contida no efluente, e, portanto, um material altamente poluidor (SILVA; BONO; PEREIRA, 2014).

Segundo Rego e Hernández (2006) a produção de vinhaça varia em função dos diferentes processos empregados na fabricação do álcool e da cachaça no Brasil. Salomon (2007) afirma que algumas usinas possuem uma produção média de 7 a 10 litros de vinhaça por litro de etanol, outras usinas mantêm uma média de 10 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol. Rodrigues et al. (2012) apresentam a relação de 1 litro de álcool para 14 litros de vinhaça. Em média, para cada litro de álcool ou cachaça produzido no processo de destilação, gera-se 15 litros de vinhaça.

Em geral, a vinhaça é rica em nutrientes minerais como potássio (K), cálcio (Ca) e enxofre (S), 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 (SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010).

Antes da descoberta do potencial como fertilizante do solo, a vinhaça era comumente descartada em rios, provocando grande mortandade de peixes. Em 29/11/1978 a portaria nº 323 do Ministério do Interior (MINTER) proibiu totalmente o descarte desse resíduo nos cursos d'água (BRASIL, 1978). Em março de 1979, a Portaria nº 53 do MINTER proibiu a aplicação de resíduos *in natura* na agricultura, alimentação de animais e corpos d'água (BRASIL, 1979).

Silva, Griebeler e Borges (2007) indicam que quando a vinhaça é aplicada em altas doses, pode acarretar efeitos indesejáveis como o comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, salinização do solo e poluição do lençol freático. Estudos realizados por Hassuda, Rebouças e Cunha (1991) indicam que a infiltração da vinhaça na água subterrânea a torna impotável, uma vez que transfere ao lençol freático, altas taxas de concentração de amônia, magnésio, alumínio, ferro, manganês, cloreto e matéria orgânica.

Salomon (2007) afirma que novas formas de utilização da vinhaça estão sendo estudadas como a reciclagem pelo processo de fermentação, diretamente na alimentação animal, para a produção de fungos após ser tratada, uso em materiais de construção, diretamente incineradas e a biodigestão com o efluente sendo utilizado para a fertirrigação.

2.2 Biodigestão anaeróbia e reatores UASB

A biodigestão anaeróbia é o processo no qual ocorre a fermentação de resíduos orgânicos, em um ambiente isento de oxigênio, através da utilização de bactérias anaeróbias que sintetizam a matéria orgânica resultando em metano e dióxido de carbono, principais componentes do biogás (SALOMON, 2007). Segundo Galbiatti et al. (2010), dependendo da eficiência do processo, o biogás formado no processo anaeróbio apresenta normalmente entre 40% e 80% de gás metano em sua composição. De acordo com Buitrón et al. (2014), a biodigestão anaeróbia é um método eficaz de tratamento de diferentes poluentes orgânicos.

Szymanski, Balbinot e Schirmer (2010) afirmam que a biodigestão anaeróbia da vinhaça surge como uma alternativa de tratamento deste subproduto, com a uma vantagem econômica: o aproveitamento do metano como fonte de energia. Porém, esse processo de biodigestão torna-se atrativo a partir do desenvolvimento de reatores de alto desempenho e baixo tempo de detenção hidráulica, como o Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo, em inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors* (UASB).

Há diversos tipos de reatores que podem ser utilizados para o processo de digestão anaeróbia, todavia, por conter baixo teor de sólidos totais e alto potencial poluente, a vinhaça é um resíduo apropriado para ser submetido ao tratamento em reator anaeróbio de fluxo ascendente (Reator UASB).

Os reatores UASB, em sua versão mais aperfeiçoada, tiveram sua origem na Holanda, na década de 1970 (CAMPOS, 1999). Nesses reatores, o fluxo é do tipo ascendente, onde o substrato flui por um leito de lodo denso, com alta atividade de degradação. De acordo com Chernicharo (2007), o lodo presente em um reator UASB varia de muito denso, com partículas granulares sedimentáveis que se posicionam no fundo do reator (leito de lodo), a um lodo mais leve que se posiciona mais próximo ao topo do reator, formando a manta de lodo. O mesmo autor afirma que a matéria orgânica é estabilizada ao longo dessas diferentes zonas de reação, sendo que o fluxo ascendente e a formação de bolhas de gás auxiliam na mistura do lodo com o substrato. Para exemplificar esse formato, uma representação esquemática de um reator UASB é mostrada na figura 1.

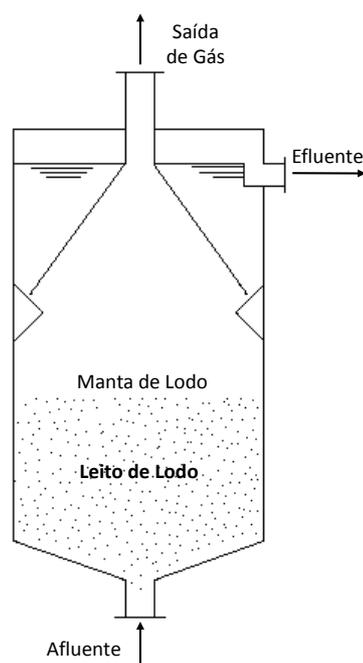


Figura 1: Representação esquemática de um reator de manta de lodo (UASB)
 Fonte: com base em Chernicharo (2007, p. 117).

Os reatores UASB apresentam vantagens, principalmente quando aplicados em locais de clima quente, sendo essa a característica da maioria dos municípios brasileiros (CHERNICHARO, 2007)

- É um sistema compacto;
- Baixo custo de implantação e operação;
- Produz pouco lodo;
- Baixo consumo de energia;
- Satisfatória eficiência na remoção de DQO e DBO;
- Possibilidade de rápida partida;
- Elevada concentração de lodo excedente.

Segundo Prado e Campos (2008) os reatores UASB possuem boa eficiência de conversão da matéria orgânica (de 65 a 75%) em subprodutos estabilizados por bactérias anaeróbias, sendo que o biogás é um deles. A biodigestão anaeróbia da vinhaça, em geral, resulta na formação de dois produtos: a vinhaça biodigerida e o biogás (SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010).

O biogás é basicamente uma mistura de metano (50 a 65%) e dióxido de carbono (35 a

40%) (MUSSOLINE, 2013), produzido por bactérias anaeróbias, utilizando resíduos orgânicos (urbano, agrícola ou industrial) como matéria-prima. Além do metano (CH₄) e do dióxido de carbono (CO₂) existe no biogás “traços de vapor de água (H₂O_{vapor}), gás sulfídrico (H₂S), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂), hidrogênio (H₂), monóxido de carbono (CO), amônia (NH₃), mercaptanas e outros gases” (PRADO; CAMPOS, 2008, p. 939). O metano é o principal componente do biogás e quanto maior a porcentagem de metano, maior é o poder energético do biogás (SOUZA et al., 2015; PRADO; CAMPOS, 2008). Tendo como fonte de matéria-prima o vinhoto, obtêm-se no biogás em média 58% de metano e um valor energético de 21.610 kJ.m⁻³ (PRADO; CAMPOS, 2008).

O biogás pode ser usado como fonte de energia direta, por meio da sua energia térmica, como combustível individual ou como complemento para outro combustível. Geralmente é usado em secadores, caldeiras, chocadeiras, aquecedores, motores para a geração de energia elétrica e mecânica, turbinas a gás, fogões, geladeiras, na iluminação dos ambientes e em muitos outros processos (MUSSOLINE, 2013; PRADO; CAMPOS, 2008).

Com relação à equivalência entre o biogás e a energia elétrica, para cada 1 m³ da mistura gasosa é possível obter entre 1,25 a 1,43 kWh de eletricidade (SALOMON, 2007).

2.3 Cálculo da produção de biogás e energia elétrica em reatores UASB

A seguir são apresentadas as equações referentes ao cálculo do reator para biodigestão anaeróbia da vinhaça em reator UASB e, em seguida, as equações do cálculo do aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica.

2.3.1. Dimensionamento do sistema de biodigestão anaeróbia

A metodologia para o dimensionamento do reator UASB foi proposta com base em Chernicharo (2007)

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

V: Volume do reator (m³)

COV: Carga orgânica volumétrica ($kg_{DQO}.m^{-3}.dia^{-1}$)

Q: Vazão diária de vinhaça ($m^3.d^{-1}$)

S₀: Carga orgânica inicial ($kg_{DQO}.m^{-3}$)

Obs.: O valor máximo do COV é de 15 / $kg_{DQO}.m^{-3}.dia^{-1}$

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

$$\text{Tempo de detenção hidráulica: } TDH = V / Q \quad (2)$$

TDH: Tempo de detenção hidráulica (dias)

$$\text{Velocidade ascendente de fluxo: } v = H / TDH \quad (3)$$

v: Velocidade ascendente de fluxo ($m.h^{-1}$)

H: Altura do reator (adotada: 6 m)

$$\text{Área de cada módulo: } A_u = V_u / H \quad (4)$$

A_u: Área de cada módulo (m²)

V_u: Volume do módulo (m³)

H: Altura do reator (m)

Largura e comprimento de cada módulo:

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

L_1 : Largura do reator (m)

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

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

Carga hidráulica volumétrica: $CHV = Q/V \quad (7)$

CHV: Carga hidráulica volumétrica ($m^3.m^{-3}.dia^{-1}$)

Obs.: Adota-se como CHV máxima $5 m^3.m^{-3}.dia^{-1}$

Carga biológica: $CB = \frac{Q.S_0}{M} \quad (8)$

CB: Carga biológica (kg_{DQO} / kg_{STV})

M: kg_{STV} presente no lodo do reator ($20 kg.m^{-3}$)

2.3.2 Dimensionamento do sistema de aproveitamento do biogás

A metodologia para o dimensionamento do sistema de aproveitamento de biogás e geração de energia elétrica foi apresentada por Lamo³ (1991 apud SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010).

Determinação da carga orgânica: $CO = Q.DQO \quad (9)$

CO: Carga orgânica ($kg_{DQO}.dia^{-1}$)

Q: Vazão diária de vinhaça (m^3)

DQO: Demanda química de oxigênio ($kg.m^{-3}$)

Produção de biogás pela biodigestão anaeróbia da vinhaça: $PB = CO.E.F \quad (10)$

E: Eficiência de remoção de DQO do processo (65%)

F: Fator de conversão de biogás por DQO removido ($0,45 m^3.kg^{-1}$ de DQO removida)

Determinação da quantidade de energia do biogás: $GEB = PB.PCIB \quad (11)$

GEB: Quantidade de energia contida no biogás ($kcal.dia^{-1}$)

PCIB: Poder calorífico inferior do biogás ($5100 kcal.Nm^{-3}$)

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

$$PEEB = GEB.E_1 \quad (12)$$

E_1 : Eficiência do motor de combustão a gás (35%)

3 MÉTODO DE PESQUISA

Descreve-se nos itens seguintes a metodologia utilizada neste estudo: a classificação e o delineamento da pesquisa, apresentando os métodos utilizados; a escolha do caso; as

³ LAMO, P. Sistema produtor de gás metano através de tratamento de efluentes industriais. Piracicaba: Codistil, 1991.

estratégias de coleta, tratamento e análise de dados; as etapas que compõem a mesma; o protocolo do estudo de caso; e, finalmente as limitações da pesquisa.

3.1 Classificação e delineamento da pesquisa

De acordo com Chizzotti (2005), a pesquisa deve ser planejada com extremo rigor, bem como deve fundamentar-se em métodos adequados ao tipo de estudo.

A presente pesquisa se caracteriza como descritiva, aplicada e com uma dimensão exploratória. Gil (1999) afirma que a pesquisa descritiva tem como principal objetivo estudar as características de uma população específica ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Já Chizzotti (2005) define a pesquisa descritiva, como aquela que se restringe à descrição dos fatos. A dimensão exploratória desta pesquisa se confirma pela incipiência do assunto, sendo que seus resultados poderão proporcionar uma nova visão do problema.

A execução da presente pesquisa foi feita com auxílio de um estudo de caso e de pesquisa aplicada. De acordo com Gil (1999, p. 72), o estudo de caso “é caracterizado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, de maneira a permitir o seu conhecimento amplo e detalhado” e, seguindo este raciocínio, Yin (2005, p. 32) lembra que o estudo de caso “é uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro do seu contexto da vida real”. Nesta pesquisa, o estudo de caso tem a finalidade de testar a teoria, já que “[...] o método de estudo de caso tem sido utilizado em gestão de operações a fim de testar questões complicadas” (FREITAS; JABBOUR, 2011, p. 12).

O caso estudado é a Cachaçaria Vanalli, um pequeno produtor de aguardente localizado no distrito de Guarapiranga (SP), escolhido de forma intencional por possuir os requisitos necessários para atender aos objetivos da pesquisa.

A pesquisa aplicada se desenvolveu a partir da teoria proposta por Chernicharo (2007) e Lamo⁴ (1991 apud SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010), para dimensionar o sistema de biodigestão e o aproveitamento do gás respectivamente, considerando os dados de produção da cachaçaria estudada.

3.2 Coleta de dados: variáveis e instrumentos

A coleta de dados é a etapa da pesquisa que exige um grande volume de tempo e trabalho para se reunir as informações necessárias. Pressupõe a organização cuidadosa da técnica e a elaboração de instrumentos adequados (CHIZZOTTI, 2005).

No que abrange à tipologia descritiva, a presente pesquisa foi dividida em duas etapas: bibliográfica e de campo. De acordo com Gil (1999, p. 65) “a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”. Já os estudos de campo são realizados a partir de coleta de dados provenientes da observação ou dados que se obtêm por meio de declarações e respostas de pessoas envolvidas no problema, que podem fornecer informações úteis aos objetivos da pesquisa (CHIZZOTTI, 2005).

Dessa forma, os dados coletados neste trabalho foram de dois tipos: primários e secundários.

- Primários: entrevistas semiestruturadas, seguindo um roteiro pré-determinado, conduzidas *in loco* com os responsáveis pela empresa estudada. Observações feitas *in loco*, com autorização para registro fotográfico, das instalações, de artefatos físicos e do processo produtivo.
- Secundários: notícias, trabalhos anteriores, artigos científicos e, com anuência da empresa, foram coletados dados pertencentes à organização estudada, como relatórios e documentos internos.

⁴ LAMO, P. Sistema produtor de gás metano através de tratamento de efluentes industriais. Piracicaba: Codistil, 1991.

Segundo Martins (2006) a entrevista “trata-se de uma técnica de coleta de dados cujo objetivo básico é entender e compreender o significado que os entrevistados atribuem a questões e situações”. Utilizou-se esse instrumento para levantar as percepções dos respondentes a respeito do processo produtivo da empresa. Os entrevistados foram o proprietário e o gerente, responsáveis pela planta utilizada como fonte de pesquisa e estudo.

A principal variável de indicação do estudo dessa empresa – variável dependente, foi o potencial de geração de energia elétrica por meio da vinhaça. Yin (2005) considera fundamental a escolha da unidade de análise, garantindo que aquele elemento selecionado seja relevante ao tema e às questões de análise. As variáveis independentes foram: vazão diária de vinhaça, carga orgânica inicial, carga volumétrica orgânica, altura do reator, volume do módulo do reator, kg de STV presente no reator, Demanda Química de Oxigênio (DQO), eficiência de remoção de DQO do processo, fator de conversão do biogás por DQO removido, poder calorífico interior do biogás, eficiência de combustão do motor a gás. Os valores das mesmas foram identificados na literatura e no estudo de caso.

De preferência, a coleta de dados para um estudo de caso deve se basear em diversas fontes de evidência. O protocolo do estudo de caso apresentado no Quadro 1 traz maiores esclarecimentos sobre as fontes de evidências, bem como todos os elementos importantes que validam o método no local pesquisado. A fundamentação da estrutura deste protocolo foi proposta por Freitas e Jabbour (2011).

Itens	Descrição
(a) Questão principal da pesquisa	Qual o potencial de geração de energia elétrica a partir da biodigestão anaeróbia de vinhaça proveniente da produção de cachaça de um pequeno produtor?
(b) Objetivo principal	Avaliar o potencial de geração de energia elétrica por meio da biodigestão anaeróbia da vinhaça de um produtor de pequeno porte.
(c) Temas de sustentação teórica	Teoria proposta por Chernicharo (2007) e Lamo (1991) para dimensionar o sistema de biodigestão anaeróbia e o aproveitamento do biogás para geração de energia.
(d) Definição da unidade de análise	Cachaçaria Vanalli: Propriedade rural localizada no interior do estado de São Paulo, produtora de cachaça de qualidade desde 1980.
(e) Indivíduos entrevistados e múltiplas fontes de evidências	Entrevistas semiestruturadas com o proprietário e o gerente de produção; relatórios de controle de produção; visitas à planta de produção.
(f) Período de realização	Durante o ano de 2014.
(g) Local da coleta e evidências	Cachaçaria Vanalli, localizada no distrito de Guarapiranga (SP).
(h) Obtenção de validade interna, por meio de múltiplas fontes de evidências	Entrevistas semiestruturadas; consulta a arquivos e documentos da empresa; observação direta; conversas informais; artefatos físicos (instalações).
(i) Síntese do roteiro de entrevista	Principais informações coletadas: histórico da empresa; descrição do processo produtivo; tipos de cachaças; produção de vinhaça; destinação da vinhaça; área de plantio de cana; consumo mensal de energia elétrica.

Quadro 1 - Protocolo do Estudo de Caso, de acordo com estrutura proposta por Freitas e Jabbour (2011)

3.3 Análise dos dados

Pode-se afirmar que a interpretação dos dados na pesquisa social refere-se à relação entre os dados empíricos e a teoria. O relatório deste trabalho tem como objetivo final,

apresentar os múltiplos aspectos que envolvam o problema de pesquisa, mostrando sua relevância, situá-lo no contexto real e indicar as possibilidades de ação para modificá-lo.

Dessa forma, foi feita a descrição do objeto pesquisado – Cachaçaria Vanalli, a partir das fontes de evidências apresentadas no protocolo do estudo de caso.

Em seguida, foram utilizados os dados coletados no estudo de caso para aplica-los nas fórmulas (1) a (12), para se obter a estimativa de energia elétrica produzida pela combustão do biogás, variável dependente alcançada pela fórmula (12).

3.4 Limitações do estudo

Como em qualquer esforço de pesquisa, há limitações e preocupações a serem praticadas a respeito das conclusões alcançadas pela pesquisa. As limitações dessa pesquisa estão incorporadas à metodologia utilizada. De acordo com Yin (2005) os estudos de caso são generalizáveis a proposições teóricas, e não a populações ou universos. Seu objetivo é expandir e generalizar teorias – generalização analítica e não estatística. Dessa forma, os resultados provenientes desse estudo não poderão ser generalizados para as demais empresas do mercado.

Um outro ponto que necessita de ressalvas é a utilização de entrevista como ferramenta de coleta. O uso desta ferramenta requer cuidados especiais para assegurar a cientificidade da técnica, a qualidade das informações coletadas, seu registro e a redução do volume de dados a elementos passíveis de análise (CHIZZOTTI, 2005).

Especificamente, este trabalho limitou-se por alguns fatores:

- A literatura encontrada para a realização deste trabalho foca o processo de biodigestão anaeróbia para grandes volumes, e este estudo visou a aplicação da teoria em um produtor de cachaça de pequeno porte.
- A pesquisa limitou-se a coletar dados e informações do processo produtivo com o proprietário e o gestor de produção da cachaçaria e visitas *in loco*.

4 ESTUDO DE CASO: CACHAÇARIA VANALLI

Este capítulo trata da apresentação da empresa pesquisada, com a descrição do caso analisado.

A Cachaçaria Vanalli, instalada no Sítio São Francisco que está localizado no distrito de Guarapiranga, município de Ribeirão Bonito, no interior de São Paulo. Nesta região é predominante o cultivo da cana-de-açúcar devido ao clima favorável e ao solo fértil.

A família Vanalli saiu do norte da Itália e imigrou para Brasil no fim do século XIX, e o interior de São Paulo tornou-se o novo lar da família desde sua chegada.

Na década de 1980 a família Vanalli iniciou a produção de cachaça e tornou-se referência na região de Guarapiranga. Em 2004 foi eleita a melhor cachaça artesanal do estado de São Paulo, eleita em um concurso realizado pela Unesp de Araraquara.

Segundo Luís Vanalli Junior, atual proprietário do Sítio São Francisco, este possui uma área de 17 hectares de cultivo da cana-de-açúcar, o que lhe rende anualmente 1.300 toneladas deste produto. O processo de produção é artesanal e apresenta uma planta antiga.

A Figura 2 (esquerda) apresenta a loja localizada na Cachaçaria onde vende-se o *mix* de cachaças a granel, descansada 2 anos, envelhecida em carvalho 2, 6 e 10 anos, e os *blends* que são cachaças com sabor, entre eles banana, abacaxi, canela, gengibre, cereja, coco e uva. A Figura 2 (direita) mostra a esteira que leva a cana para a moenda, porém passa antes por um desfibrador que prepara a matéria prima para um melhor aproveitamento da extração do caldo.



Figura 2: Loja localizada na Cachaçaria Vanalli (esquerda) e Esteira e Moenda Cachaçaria Vanalli (direita)

O caldo extraído passa por um processo de peneiramento, decantação e, por último, diluição para a correção do *brix*, que deve ser 15°. A Figura 3 (esquerda) apresenta a peneira e o decantador da cachaçaria estudada. A próxima etapa do processo de produção de cachaça é a fermentação que ocorre nas dornas, apresentadas na Figura 3 (direita), que juntas fermentam 32 mil litros de caldo em 24 horas.



Figura 3: Peneira e decantador (esquerda) e dornas de fermentação (direita)

As três dornas maiores à esquerda na Figura 4 (esquerda) são chamadas dornas volante, onde o vinho, resultado do mosto fermentado é armazenado para em seguida seguir para o processo de destilação. Na cachaçaria estudada o processo de destilação ocorre em uma coluna de destilação de baixa graduação, conforme apresenta-se na Figura 4 (direita), diferentemente da maioria dos produtores que destilam em alambiques de cobre.



Figura 4: Dornas volante (esquerda) e coluna de destilação (direita)

A cachaça destilada segue então para o reservatório (Figura 5 – esquerda), enquanto a vinhaça cai no tanque (Figura 5 – direita), a partir de onde ela é bombeada para irrigar a área de cultivo.



Figura 5: Reservatório de cachaça (esquerda) e tanque para vinhaça (direita)

A cachaça é envelhecida em tonéis de carvalho de até 700 litros, como mostrado na Figura 6 (esquerda), que apresenta uma das salas de envelhecimento da cacharia Vanalli. A cachaça já descansada ou envelhecida é bombeada para os reservatórios apresentados na Figura 6 (direita), a partir dessa etapa do processo está pronta para ser envasada.



Figura 6: Tonéis de carvalho (esquerda) e reservatórios da cachaça envelhecida (direita)

Como se pode observar, o processo de envase (Figura 7 – esquerda) e lacração (Figura 7 – direita) na cacharia Vanalli é manual.



Figura 7: Equipamentos de envase (esquerda) e lacração (direita)

Em 2014 a Cachaçaria Vanalli não produziu cachaça devido a sua falta de capacidade de armazenamento, que atualmente é de 150 mil litros nos quais 50% são em aço inox e 50% em tonéis de madeira. Portanto, os dados coletados foram informados pelo proprietário da Cachaçaria de acordo com sua média de produção.

No período da safra Cachaçaria Vanalli produz 1.000 litros de cachaça e gera 12.000 litros de vinhaça diariamente. Sua produção dura em média 4,5 meses, lhe rendendo cerca de 130.000 litros de cachaça e 1,56 milhão de litros de vinhaça.

A vinhaça é armazenada em um tanque com capacidade para 30.000 litros, portanto, ela é totalmente bombeada para a área de cultivo praticamente sem tempo de descanso. O consumo de energia da planta gira em torno de 5.000 kWh ao mês quando em pleno funcionamento. Por não estar em processo produtivo, não foi possível coletar mais informações, logo a teoria foi aplicada com base nos dados apresentados.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A teoria proposta por Chernicharo (2007), Lamo (1991) e aplicada por Szymanski, Balbinot e Schirmer (2010), para dimensionar o sistema de digestão e o aproveitamento do gás foi empregada utilizando-se os dados da Cachaçaria Vanalli. A Tabela 1 relaciona os resultados obtidos.

Tabela 1 - Dimensionamento do sistema de biodigestão e aproveitamento do biogás

Equação	Descrição	Símbolo	Valor
1	Volume do reator	V	24,00 m^3
2	Tempo de detenção hidráulica	TDH	2,00 <i>dias</i>
3	Velocidade ascendente do fluxo	v	0,13 m/h
4	Área de cada módulo	A_u	1,33 m^2
5	Largura do reator	L_1	1,15 m
6	Comprimento do reator	L_{2u}	1,15 m
7	Carga hidráulica volumétrica	CHV	0,50 $m^3 \cdot m^{-3} \cdot dia^{-1}$
8	Carga biológica	CB	18,00 kg_{DQO} / kg_{STV}
9	Determinação da carga orgânica	CO	360,00 kg_{DQO} / dia
10	Produção de biogás pela biodigestão anaeróbia da vinhaça	PB	105,30 m^3
11	Determinação da quantidade de energia do biogás	GEB	537.030,00 $kcal / dia$
12	Estimativa de energia elétrica produzida pela combustão do biogás	PEEB	187.960,50 $kcal / dia$
Variáveis independentes	Carga orgânica inicial	S_0	30,00 kg/m^3
	Vazão diária de vinhaça	Q	12,00 m^3/dia
	Carga orgânica volumétrica	COV	15,00 kg/m^3
	Altura do reator	H	6,00 m
	Volume do módulo	V_u	8,00 m^3
	kg STV presente no lodo do reator	M	20,00 kg/m^3
	Demanda química de oxigênio	DQO	30,00 kg/m^3
	Eficiência de remoção de DQO do processo	E	0,65
	Fator de conversão do biogás por DQO removido	F	0,45 m^3/kg
	Poder calorífico interior do biogás	PCIB	5100,00 $kcal/m^3$
Eficiência de combustão do motor a gás	E_1	0,35	

Na Tabela 1, as equações de 1 a 8 apresentam o dimensionamento do sistema de biodigestão anaeróbia; as equações de 9 a 12 mostram o dimensionamento do sistema de aproveitamento do biogás e os demais itens relacionam valores obtidos na literatura ou no objeto estudado, formando o conjunto de variáveis independentes.

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 1, para uma vazão diária de 12 m^3 de vinhaça, necessita-se de 3 reatores de 8 m^3 , sendo que o tempo para o processo de biodigestão ser finalizado é de 2 dias. O processo irá gerar aproximadamente 105,30 m^3 de biogás e a estimativa de energia elétrica produzida diariamente foi de 187.960,50 kcal/dia, ou

seja, considerando que 1 kWh equivale a 859,84 kcal, a capacidade de geração de energia na Cachaçaria Vanalli é cerca de 218,60 kWh/dia.

Durante a safra a produção trabalha 26 dias por mês, o que resultaria em 5.683,6 kWh/mês. Considerando que o consumo médio de energia elétrica da planta é de 5.000 kWh/mês, a energia gerada seria capaz de alimentar a planta e sobriariam 683,60 kWh/mês.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a necessidade cada dia maior de buscar sustentabilidade nos processos produtivos, os resultados obtidos provaram a viabilidade técnica da geração de energia elétrica através da biodigestão anaeróbia da vinhaça em um pequeno produtor de cachaça, uma vez que no mínimo geram a quantidade de energia necessária para alimentar toda a planta. O potencial de geração de energia elétrica com a instalação de um reator UASB na cachaçaria é de 5.683,6 kWh/mês, excedendo a necessidade da planta, que é de 5.000 kWh/mês.

Além disso, a vinhaça após processada em um reator UASB diminui a DQO, eleva o pH e não perde sua propriedade fertilizante, podendo ser utilizada sem causar danos ao solo e à água dos lençóis freáticos.

Para estudos futuros, faz-se necessário realizar uma análise de viabilidade econômica para a implantação do sistema para geração de eletricidade através da biodigestão da vinhaça para o pequeno produtor de cachaça.

REFERÊNCIAS

ABRABE. **Associação Brasileira de Bebidas**. Disponível em:

<<http://www.abrabe.org.br/categorias/#>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1687>. Acesso em: 15 abr. 2015.

BRASIL. Portaria nº 53 de março de 1979. Dispõe sobre o tratamento e disposição final de resíduos sólidos de qualquer natureza. **Diário Oficial da União**, Brasília, p. 3.356, 08 de mar. 1979.

BRASIL. Portaria/GM nº 323 de 29 de novembro de 1978. Dispõe sobre o controle do lançamento de vinhoto em coleção hídrica. **Diário Oficial da União**, Brasília, Seção 1, p. 19.456, 04 de dez. 1978.

BUITRÓN, G.; KUMAR, G.; MARTINEZ-ARCE, A.; MORENO, G. Hydrogen and methane production via a two-stage processes (H₂-SBR + CH₄-UASB) using tequila vinasses. **International Journal of Hydrogen Energy**, n. 39, p. 19249-19255, 2014.

CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2007.

CHIZZOTTI, A. **Pesquisa em ciências humanas e sociais**. 7. ed. São Paulo: Cortez, 2005.

FREITAS, W. R. S.; JABBOUR, C. J. C. **Estudo & Debate**, Lajeado, v. 18, n. 2, p. 07-22, 2011.

GALBIATTI, J. A.; CAMELO, A. D.; SILVA, F. G.; GERARDI, E. A. B.; CHICONATO, D. A. Estudo quali-quantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 432-437, 2010.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

HASSUDA, S.; REBOUCAS, A. C.; CUNHA, R. C. A. Impactos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero Bauru. **Boletim IG-USP**, publ. esp., n. 9, p. 169-171, 1991.

IBGE. **Censo agropecuário 2006**: Brasil, grandes regiões e unidades da federação – segunda apuração. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Agropecuario_2006/Segunda_Apuracao/censoagro2006_2apuracao.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2015.

IBRAC. Instituto Brasileiro da cachaça. **Mercado Interno**. Disponível em: <<http://www.ibrac.net/index.php/servicos/estatisticas/mercado-interno>>. Acesso em: 16 mar. 2015.

LAMO, P. D. **Sistema produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais**. METHAX/BIOPAQ – CODISTIL – Piracicaba, 1991.

LAMONICA, H. M. Potencial de geração de excedentes de energia elétrica com o biogás produzido a partir da biodigestão da vinhaça na indústria sucro-alcooleira brasileira. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC00000002200600200027&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 13 abr. 2015.

MUSSOLINE, W. **Enhancing the methane production from untreated rice straw using an anaerobic co-digestion approach with piggery wastewater and pulp and paper mill sludge to optimize energy conversion in farm-scale biogas plants**. 2013. 145 f. Thèse (Docteur - Spécialité: Science et Technique de l'Environnement)-Université Paris-Est; Université de Cassino, Italy, 2013.

PRADO, M. A. C.; CAMPOS, C. M. M. Produção de biogás no tratamento dos efluentes líquidos do processamento de *Coffea arabica L.* em reator anaeróbico UASB para o potencial de aproveitamento na secagem do café. **Ciência e agrotecnologia**. Lavras, v. 32, n. 3, p. 938-947, maio/jun., 2008.

REGO, E. E.; HERNÁNDEZ, F. D. M. Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar: contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC00000002200600100053&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 09 abr. 2015.

RODRIGUES, A.; SANTOS, R. F.; AVACI, A. B.; ROSA, H. A.; CHAVES, L. I.; GASPARIN, E. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da vinhaça.

Acta Iguazu, Cascavel, v. 1, n. 2, p. 80-93, 2012.

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 em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SICOBÉ. **Sistema de Controle de Produção de Bebidas**. Disponível em: <<http://www.receita.fazenda.gov.br/PessoaJuridica/Bebidas/ProdOutrasBebidasMensal.htm#Ano%20-%202014>>. Acesso em: 16 mar. 2015.

SILVA, A. P. M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 38-43, 2014.

SILVA, M. A. S. da; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, fev. 2007.

SILVA, W. P.; ALMEIDA, C. D. G. C.; ROLIM, M. M. R.; SILVA, Ê. F. F.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, V. G. F. Monitoramento da salinidade de águas subterrâneas em várzea cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 4, p. 394-401, abr. 2014.

SOUZA, G. M.; VICTORIA, R. L.; JOLY, C. A.; VERDADE, L. M. **Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps**. São Paulo: Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 2015. 735 p.

SZYMANSKI; M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 901-912, out./dez. 2010.

VENTURINI FILHO, W. G.; NOGUEIRA, A. M. P. **Aguardente e cachaça**. Botucatu: UNESP, 2013. 72 p. Disponível em: <<http://www.fca.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/Horticultura/aguarentes-e-cachaca-2013.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2015.