

UMA BREVE REVISÃO SOBRE A INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA NO BRASIL COM ENFOQUE NO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Isabela Zanon Pereira¹
Ivan Felipe Silva dos Santos¹
Hellen Luisa de Castro e Silva¹
Regina Mambeli Barros¹

¹*Universidade Federal de Itajubá*

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i2.477>

RESUMO

O Brasil é o principal produtor de cana-de-açúcar no mundo e a indústria sucroalcooleira é um dos principais pilares da economia Brasileira. Na indústria sucroalcooleira são produzidos dois resíduos com altíssimo potencial de geração de energia: o bagaço e a vinhaça. O bagaço é usado para geração de energia por meio de sua combustão e a vinhaça, pela combustão do biogás produzido pela digestão anaeróbia desta. Neste contexto, o presente artigo apresenta uma breve revisão da indústria da cana no país com enfoque sobre estes dois resíduos e seu potencial energia, levantando discussões sobre as atuais utilizações e as potencialidades de ambos. As discussões aqui levantadas podem ser utilizadas para fomentar debates e pesquisas sobre o aproveitamento energético destes resíduos no país.

Palavras-chave: Indústria Sucroalcooleira, Cana-de-açúcar, Bagaço, Vinhaça e geração de energia.

ABSTRACT

Brazil is the main producer of sugarcane in the world and the sugar and alcohol industry is one of the main pillars of the Brazilian economy. In the sugar and alcohol industry, two residues are produced with a very high energy generation potential: bagasse and stillage. Bagasse is used to generate energy through its combustion and vinasse, by combustion of biogas produced by its anaerobic digestion. In this context, this article presents a brief review of the sugarcane industry in the country with a focus on these two residues and their energy potential, raising discussions about the current uses and the potential of both. The

discussions raised here can be used to promote debates and research on the energy use of this waste in the country.

Keywords: Sugar and alcohol industry, Sugarcane, Bagasse, Vinasse and energy generation.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é um dos recursos com grande potencial de crescimento para se gerar energia elétrica através da biomassa, uma vez que o Brasil é o maior produtor do mundo (NOVACANA, [s.d]). A biomassa é a terceira principal fonte interna de energia elétrica no país, representando 8,2% e superada apenas pela energia hidráulica e pelo gás natural, de acordo com os dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2017). É também considerada uma das fontes de produção de energia com maior potencial de crescimento, tanto para o mercado interno quanto para o externo, tendo capacidade de abastecimento de mais da metade dos consumidores do Estado de São Paulo, com 45 milhões de habitantes. Ainda, de acordo com a COGEN (Associação da Indústria de Cogeração de Energia), esse tipo de energia possui capacidade instalada de 10,8 GW (BIOMASSA & BIOENERGIA, 2016).

A participação da cana na geração de energia contribui para a diversificação da matriz elétrica, bem como para a preservação dos níveis dos reservatórios, pois a safra coincide com os períodos de estiagem na região Sudeste e Centro-Oeste. Nesse sentido, a energia fornecida pela combustão do bagaço da cana auxilia no consumo desse período, além de criar benefícios ambientais, resultando na redução dos gases do efeito estufa, na destinação correta do resíduo, juntamente com benefícios econômicos, não necessitando da compra de energia do mercado livre com tarifas de venda elevadas.

Neste contexto, o presente artigo revisa os principais aspectos ligados aos dois resíduos com maior potencial de produção de energia na indústria sucroalcooleira: a vinhaça e o bagaço.

2. INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil iniciou-se na fase de colonização, no século XVI, e passou por transformações quantitativas e qualitativas, que permitiram que o Brasil fosse um importante abastecedor de produtos de cana-de-açúcar para quase todo o mundo. Os resultados foram em elevados lucros com a exportação, tanto para a coroa portuguesa, quanto para o Brasil, quando deixou de ser colônia (ARAÚJO; SANTOS, 2012).

Desse modo, a cana-de-açúcar chegou ao Brasil em 1532, quando foi instalado o primeiro engenho de açúcar no litoral de São Paulo,

na Capitania de São Vicente. Este fato foi considerado o marco zero da colonização. A partir de então, a cana-de-açúcar se desenvolveu e tomou a liderança da produção mundial, principalmente devido às condições de solo fértil e propício, e o clima favorável para esse desenvolvimento. Vale ressaltar que, esse mercado europeu foi abastecido pelos engenhos de Pernambuco e Paraíba, embora tenha sido iniciada em São Paulo, como afirma Flausinio (2015).

Fatos importantes que devem ser levados em conta na história do desenvolvimento da cana-de-açúcar no Brasil é a parceria com os holandeses, pois estes promoveram a expansão da indústria, durante os anos que foram responsáveis pela comercialização e distribuição do açúcar pela Europa. E o período seguinte com o fim da aliança e as invasões holandesas, pois quebraram o monopólio da produção de açúcar, devido ao conhecimento adquirido na fase de ocupação, o que resultou em diminuição de preço e de exportações pelo Brasil (FLAUSINIO, 2015).

Dessa forma, a produção de açúcar foi a principal geração de renda durante os séculos XVI e XVII para o país, e somente com a descoberta do ouro no século XVIII, houve uma redução na produção. Ademais, a descoberta do açúcar da beterraba e a Primeira Guerra Mundial, também foram fatores que contribuíram para essa redução de produção, que foi sustentada, durante alguns anos, pela produção de cachaça (FLAUSINIO, 2015).

Com a globalização, o Brasil se tornou o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e o maior produtor de etanol de cana-de-açúcar. Atualmente, São Paulo está em primeiro lugar na produção de açúcar e foi capaz de superar Pernambuco apenas na crise do café, acentuada pela turbulência americana em 1929, produzindo cerca de 55% de área plantada no país, baseado na União da Indústria de Cana de Açúcar (ÚNICA, s/d).

Em 1970, o etanol obteve destaque apenas após a crise do petróleo, o qual era a principal matriz energética na época. Dessa forma, com o aumento dos índices inflacionários provocados pela crise, houve um incentivo de se obter energia através de fontes alternativas, resultando então, no Programa Nacional do Álcool (Proálcool), na segunda metade da década de 70 (ARAÚJO; SANTOS, 2012).

De acordo com Araújo e Santos (2012), o principal objetivo do programa era a substituição dos combustíveis derivados do petróleo para combustíveis derivados de origem vegetal, estimulando assim, a produção de álcool para atender as necessidades internas e externas. Porém, nessa época, toda a frota de veículos era movida por combustíveis fósseis, e apenas na década de 90 que novos testes de implementação e produção em larga escala começaram a ser estimulados.

Entretanto, as implementações efetivas desses testes com biocombustível aconteceram de fato nos últimos quarenta anos e com maior intensidade na década de 2000 (BENETTI, 2009). Desse modo, houve um incentivo a pesquisas sobre energias renováveis, que contribuíram para o aumento da produtividade da indústria da cana, diminuição gradativa em todo processo produtivo, obtendo ganho de qualidade.

Além disso, houve grandes adaptações em todo o processo produtivo do álcool como fonte de energia, principalmente com a chegada dos carros flexfuel. Atualmente, o etanol continua sendo muito consumido devido a sua adição de 27% na gasolina comum e 25% na gasolina Premium, baseado no Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA) por meio da Resolução Nº 1, 04 de março de 2015.

Representando o cenário nacional de produção, em 2016, com base na UNICA (s/d), a produção nacional de açúcar foi de 38,9 milhões de toneladas, com alta de 13,7% em relação ao ano anterior, enquanto a do etanol caiu 6,5%, atingindo 28276,4 mil m³.

Tal fato, resultou em um aumento de aproximadamente 0,61% na área plantada de cana-de-açúcar no país, entre os anos de 2015 e 2016, obtendo-se uma área de 10,2 milhões de hectares, tendo uma maior participação da região Centro-Sul (9,2 milhões de hectares) do que a região Norte-Nordeste (1,1 milhões de hectares) ÚNICA (s/d). Quanto ao cenário de exportações, o Brasil exportou 27,8 milhões de toneladas de açúcar na safra de 2017/2018 e 1,4 milhões de m³ de etanol nesse mesmo período ÚNICA (s/d).

Além disso, quanto ao cenário de geração de eletricidade, a geração total no Brasil foi de 578,9 TWh e o bagaço da cana teve uma contribuição de 35,236 TWh, estando em terceiro lugar comparado as outras fontes de energia, conforme a Figura 1, baseada no Balanço Energético Nacional (BEN, 2017).

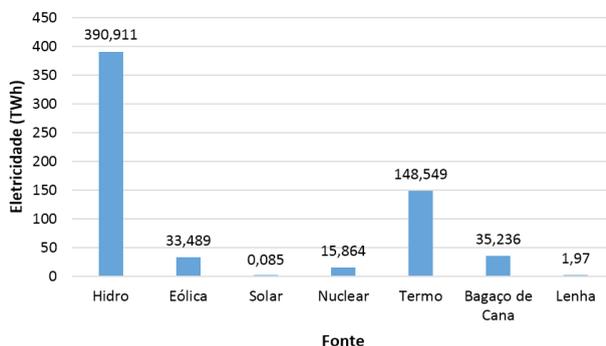


Figura 1 - Geração de Eletricidade por Fonte no Brasil

A partir dos dados apresentados, nota-se a importância da cana-de-açúcar para a geração de capital para o Brasil. Ademais, além da geração de renda pela produção e exportação da cana, com a biomassa gerada no processo é possível duas ou mais fontes de energia com apenas um único combustível, podendo gerar energia elétrica que supre a necessidade da indústria e pode gerar excedentes que abastecem a rede. Logo, amplia as oportunidades do setor, diversifica a matriz energética e promove o ganho ambiental, pela redução das emissões de compostos responsáveis pelo efeito estufa (FLAUSINIO, 2015).

3. RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

O Brasil possui o conhecimento completo no ciclo de produção do açúcar e de etanol e possui um modelo de produção com um diferencial entre seus concorrentes, por ter criado um processo produtivo integrado, entre as usinas de etanol e açúcar (FLAUSINIO, 2015).

Dessa forma, a cadeia produtiva da usina de etanol e açúcar é composta por duas etapas, uma agrícola e outra industrial. Tendo como principais resíduos, o bagaço e a vinhaça, conforme mostrado no fluxograma da Figura 2 (SOUZA, 2010 apud FLAUSINIO, 2015).

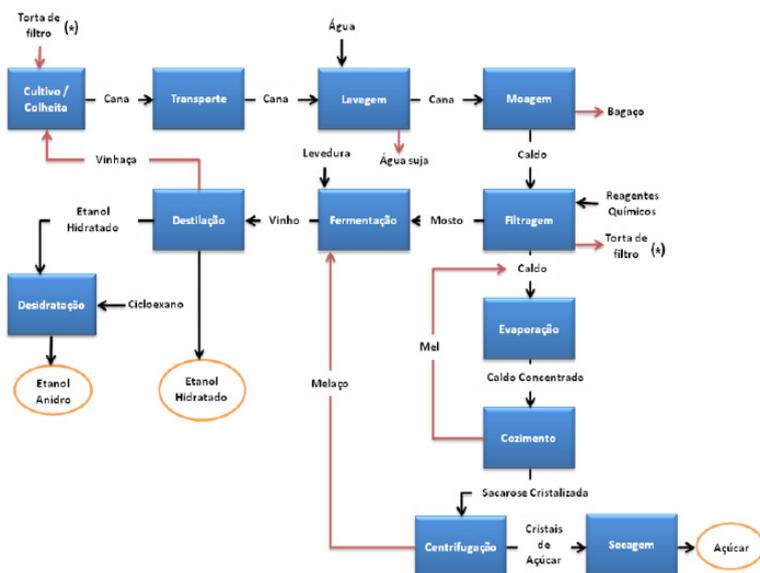


Figura 2 - Fluxograma do processo produtivo de uma indústria sucroalcooleira

A etapa agrícola se inicia com o cultivo da cana-de-açúcar, sendo um fator importante nessa etapa a escolha da variedade da cana, de acordo com as características climáticas e morfológicas da região de plantio. Além disso, também é importante analisar o ciclo da cana. No Brasil, de acordo com Flausinio (2015), ele dura em média 6 anos, realizando o primeiro corte no 12º mês, o segundo no 18º mês e depois a cada 1 ano, e à medida que se realiza esses cortes, cai a produtividade. São Paulo possui uma produtividade média entre 85 t/ha a 90t/ha.

A segunda etapa é a colheita, que acontece nos períodos mais secos do ano, para favorecer a maturação. É realizada, na maioria das vezes, de forma manual. A última etapa da fase agrícola é o transporte da cana, feito da forma mais rápida possível para que não ocorra a perda da qualidade do produto e por ser perecível, para as usinas, na média de 24 horas e no máximo 72 horas (FLAUSINIO, 2015).

Para iniciar a fase industrial, quando a cana chega à usina, a primeira etapa varia se a colheita é manual ou mecanizada. Na do tipo manual, a cana precisa ser lavada e picada, para posteriormente ser moída e na mecanizada, a cana já passa para moagem, como afirma a NovaCana (s/d).

A etapa de moagem é necessária para a extração do caldo, e pode ser realizada por dois diferentes processos moendas ou difusores. De acordo com Fonseca (2016), pelo processo das moendas, a cana passa por um conjunto de rolos de pressão, onde é feita a retirada do caldo. Para tornar o processo mais eficaz, é injetada água, gerando como resíduo, o bagaço, com umidade em torno de 50%.

No segundo processo, por difusores, a cana passa por sucessivas lavagens com água quente, para que os açúcares presos se soltem com a água quente e em seguida a cana passa por um rolo de secagem (FLAUSINIO, 2015).

Dessa forma, o caldo segue para produção do açúcar ou do etanol, em usinas em que a produção de etanol está associada a produção de açúcar, Flausinio (2015) afirma que os primeiros caldos são levados para a produção do açúcar, passando por tratamento químico para coagular, flocular, precipitar as impurezas por decantação e a filtração.

Assim, o caldo tratado resultante é submetido a altas temperaturas, a fim de concentrar a sacarose e fazer sua cristalização. Logo, a solução residual desse processo é denominada melaço, que possui altas quantidades de glicose e sacarose (RODRIGUES, 2017).

A produção do etanol começa com o caldo tratado, melaço ou mosto, que é a mistura dos dois. Passando para a etapa de fermentação alcoólica, que de acordo com Rodrigues (2017), o mosto é adicionado em dornas junto com leveduras, por um período de 8 a 12 horas, dando

origem ao vinho. O vinho fermentado possui concentração de 7% a 10% e para aumentar a concentração de álcool, o vinho é levado a destilação, alcançando cerca de 96% de álcool e 4% de água, em volume, gerando como resíduo a vinhaça (FLAUSINIO, 2015).

Desse modo, o etanol produzido pode ser comercializado ou ser usado para produzir o etanol anidro, que possui 99,7% em volume de álcool, com baixo teor de água, de acordo com Santos et al. (2013 apud Fonseca, 2016). A produtividade da fabricação do etanol a partir da cana, de acordo com a Braskem (2020), é de 6,5 mil litros por hectare plantado.

Na indústria sucroalcooleira os principais resíduos são o bagaço e a vinhaça. O bagaço é resultante da etapa de moagem da cana e recém-moído, e segundo Santos et al. (2011), possui cerca de 50% de umidade, 45% de fibras lignocelulósicas, de 2% a 3% de sólidos insolúveis e de 2% a 3% de sólidos solúveis. Sendo que, a celulose, hemicelulose e lignina, as principais responsáveis pelo conteúdo energético do material.

Durante muitos anos, o bagaço foi queimado para gerar calor, em substituição à lenha. Porém, devido as adversidades que ele trazia, como sujeira, ocupação de espaço, necessidade de transporte, entre outros pontos, e, com intuito da utilização por completo do resíduo, ele passou a ser usado como combustível nas caldeiras, nos sistemas de cogeração (LINHARE; ARAÚJO; SILVA, 2018).

Essa biomassa é de maior representatividade na matriz energética brasileira, pois é responsável pelo suprimento de energia elétrica, térmica e mecânica dessas indústrias a partir desse sistema de cogeração (SANTOS et al., 2011).

A cogeração apresenta uma série de vantagens, como Oliveira, Neves e Waitman (2017) afirmam, dentre elas pode-se destacar: (i) diminuição no lançamento de gases de efeito estufa na atmosfera, visto que possui bioeletricidade neutra em carbono¹, promovendo o desenvolvimento de energia limpa; (ii) redução nas perdas no sistema de transmissão, pois as usinas sucroalcooleiras estão localizadas na região centro-sul, que é a região de maior consumo; (iii) a eletricidade gerada por ser escoada diretamente pela rede de distribuição, (iv) uso eficiente dos insumos e sendo eles de origem nacional.

Outros usos do bagaço estão para compostos de ração animal, fertilizantes, biogás, matéria-prima para compensados e insumos energéticos para outros setores industriais, como papel, celulose, cerâmicas e retífica de pneus (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

¹ A bioeletricidade é realizada em ciclo fechado. Nesse caso, contribui para o desenvolvimento do setor energético brasileiro garantindo a oferta de energia elétrica até mesmo nos tempos de estiagem, resultando também o desenvolvimento do setor sucroalcooleiro e sustentável (OLIVEIRA; NEVES; WAITMAN, 2017).

O outro resíduo de grande importância gerada no setor é a vinhaça que atualmente é o principal subproduto da fabricação do álcool, devido ao seu grande volume gerado e sua potencialidade de uso, sendo composta, na sua maioria, por água, cerca de 97% e o restante que compõe a fração sólida é constituída por matéria orgânica e elementos minerais, com destaque para o Potássio que representa 20% dos minerais presentes (MARQUES, 2006 apud SILVA, 2012).

A vinhaça recebe três denominações, de acordo com Almança (1994), com base no mosto (líquido passível de fermentação) que lhe deu origem: vinhaça de mosto de caldo, vinhaça de mosto de melaço e vinhaça de mosto misto. A primeira é decorrente da cana-de-açúcar moída, a segunda, da separação do açúcar cristalizado e do mel final e a terceira da mistura das duas anteriores.

Ela não pode ser lançada no corpo hídrico in natura por possuir alta carga de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), 12.000 a 20.000 ppm, e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO), colocando em risco a vida de animais aquáticos (SILVA, 2012). Uma vez que, podem tornar o balanço de oxigênio negativo, que se dá pela diferença de DBO pelo OD, em outras palavras, pela diferença da quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica, pela quantidade de oxigênio disponível.

Além disso, pode conter a presença de metais pesadas e poluentes orgânicos xenobióticos, como o fenol, cloreto de metileno, clorofórmio e pentaclorofenol. Os compostos fenóticos são tóxicos a muitos microorganismos, como por exemplo, os que estão presentes nos tratamentos de águas residuárias. Além disso, pode contribuir com epidemias de malária, amebíase e esquistossomose, além de provocar mau cheiro ao corpo d'água (BERNAL et al., 2017).

Ademais, ressaltam-se outras características importantes da vinhaça, como o seu poder corrosivo, por possuir pH muito baixo, fazendo com que seja necessário o uso de materiais resistentes e apropriados ao seu manejo hidráulico, como também sua alta concentração de potássio. Sendo que, a cada m³ de vinhaça produzido, há um ganho de 3 kg de potássio, então a vinhaça produzida em uma determinada área de plantio de cana-de-açúcar é autossuficiente desse mineral (SILVA, 2012).

Quanto a produção de vinhaça a partir do álcool, é oportuno mostrar que, a cada 1 hectare de área plantada de cana-de-açúcar se produz em média 80 t, que produz 83,3 L de álcool/t, que produz 13 L de vinhaça/L de álcool (SILVA, 2012).

Logo, motivados pela imensa quantidade de vinhaça produzida, seu potencial energético e pelas normas ambientais, as indústrias sucroalcooleiras começaram a pensar em soluções tecnológicas para esse resíduo, a partir da oportunidade de transformar o custo em um

benefício (ambiental e financeiro), ao invés de descartar in natura em corpos d'água ou solo, por exemplo.

Sendo assim, as alternativas para a disposição da vinhaça são: Aerobiose; Reciclagem de efluente na fermentação; Fertirrigação; Combustão; Produção de levedura; Uso na construção civil, na fabricação de ração animal e Digestão anaeróbia (CORAZZA, 2006 apud SILVA, 2012).

A aerobiose, reciclagem de efluente na fermentação e fertirrigação são soluções mais simples do ponto de vista tecnológico, fato que provavelmente propiciou a utilização dessas soluções em maior escala, principalmente, a fertirrigação, que consiste em fertilizar e irrigar a lavoura na mesma operação. Trate-se da substituição dos nutrientes minerais (nitrogênio, fósforo e principalmente potássio), gerando um balanço de despesa-receita positivo. Porém, não se mostra uma técnica eficiente se praticada de forma descontrolada, como afirma Bernal et al. (2017).

4. GERAÇÃO DE ENERGIA PELO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O uso do bagaço para a geração de energia elétrica apresenta uma série de vantagens como: ser um recurso abundante, com produção descentralizada, reduz a poluição ambiental, pela não utilização de combustível fóssil e diversifica a matriz energética. Apesar de suas vantagens econômicas e ambientais, o aproveitamento desse recurso para a geração de energia elétrica está abaixo do seu potencial.

Como pode ser observado no relatório final do Balanço Energético Nacional de 2017 (BEN 2017), o Brasil produziu 168.567 mil toneladas de Bagaço da cana e somente 28.686 mil toneladas foram transformadas em energia elétrica, representando, então, o grande potencial para geração de energia por esse resíduo.

De acordo com Souza (2004 apud Souza e Azevedo, 2006), apenas com o excedente de energia produzido por parte das usinas paulistas do setor sucroalcooleiro, a partir do bagaço e da palha, seria capaz de suprir o déficit de toda a região Sudeste, durante a crise de 2001-2002, por ocasião do racionamento.

Por outro lado, sua principal desvantagem é não ser possível produzir calor e energia de forma direta e contínua, por ser gerado de forma sazonal; estocagem nos pátios, nos períodos entressafas, que resultam em perdas e ineficiência do processo, pela dificuldade de organização das pilhas (devido as suas dimensões).

Porém, como o bagaço é considerado o maior dejetado da agroindústria nacional e por apresentar vantagens de ordem econômica e

ambiental, é um recurso que deve ser estudado para melhor aproveitamento (SOUZA E AZEVEDO, 2006).

O processo de geração de energia através do bagaço segue as etapas: Em primeiro lugar, a sua produção começa com a sua retirada das moendas e difusores, após a extração do calda da cana-de-açúcar, com umidade cerca de 50%. Então este é enviado para as caldeiras onde ocorre a queima do combustível para produzir vapor.

Esse vapor superaquecido possui temperaturas entre 723K a 803K, em usinas modernas. Em seguida, o vapor se expande nas turbinas e produz trabalho mecânico, acionando o gerador (CORRÊA NETO; RAMON, 2002).

Em um sistema de cogeração, esse vapor, com baixa pressão e menor temperatura, antes de passar pelo condensador e retornar em estado líquido a caldeira, pode ser utilizado para diversos fins no processo industrial, como evaporação, cozimento, secagem, entre outros.

Desse modo, de acordo com Flausinio (2015), existem dois sistemas básicos de cogeração. O primeiro com turbina em contrapressão, onde o condensador é substituído pelo próprio processo industrial. E o segundo, com a turbina de condensação, onde o calor retorna à turbina na forma líquida. No setor sucroalcooleiro nacional, o sistema mais difundido é o que utiliza a turbina de contrapressão. Na Figura 3 (FLAUSINIO, 2015) é apresentado um sistema de cogeração de energia pelo bagaço com turbina a vapor com presença de condensador.

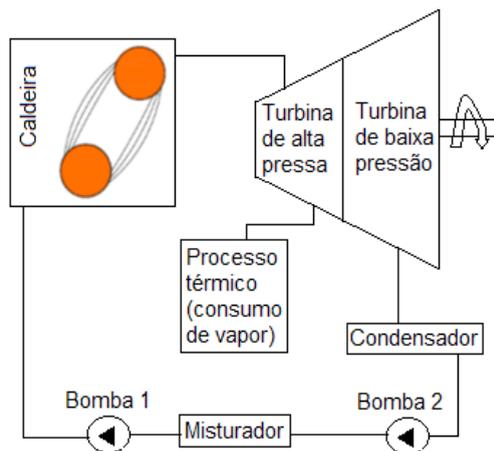


Figura 3 - Sistema de Cogeração de energia a partir do bagaço com turbina a vapor e condensador

Por fim, quanto ao armazenamento do bagaço para ser utilizado, principalmente na entressafra, deve ser feito de forma rigorosa e planejada. Pois, devido a ação de decompositores, pode ocorrer o desenvolvimento de bagaçose, que é uma pneumonia da hipersensibilidade caracterizada por inflamações dos brônquios e alvéolos, que atinge os trabalhadores (SILVA, 2013).

5. GERAÇÃO DE ENERGIA PELA VINHAÇA

A utilização da vinhaça para a geração de energia inicia-se com o processo de digestão anaeróbia, que é um processo de degradação bioquímica da vinhaça por meio de bactérias que atuam na presença de oxigênio, e o resultado é a matéria orgânica degradada e a produção de biogás, composto em sua maioria por CH₄, CO₂ e pequenas quantidades de H₂S (SILVA, 2012).

O processo de biodigestão é empregado para o tratamento do efluente e geração de energia a partir do efluente tratado, sendo composto em quatro principais etapas, com presença de diferentes grupos de bactérias, de acordo com Foresti et al. (1999), conforme demonstrado na Figura 4.

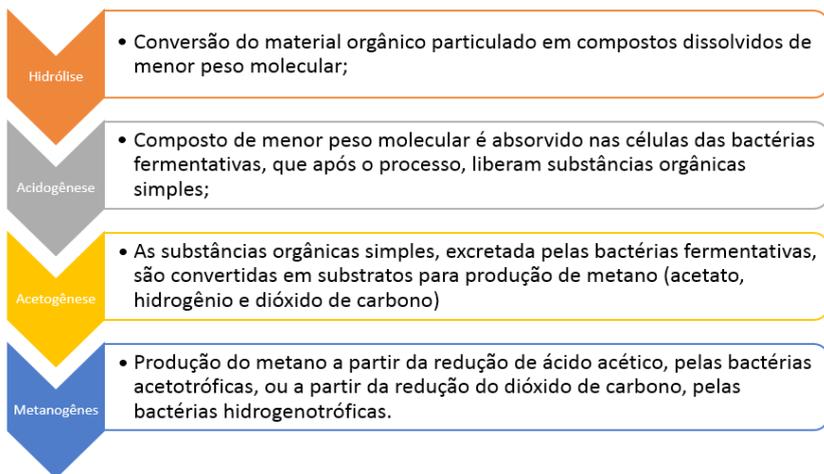


Figura 4 - Fluxograma do processo de biodigestão da vinhaça

Desse modo, a digestão anaeróbica ocorre em biodigestores, que podem trabalhar em bateladas ou fluxo contínuo. Para o setor su-

sucroalcooleiro, o mais indicado é o de fluxo contínuo, devido à grande produção de vinhaça gerada, como afirma Poveda (2014), como é o caso do Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, popularmente conhecido como reator UASB.

De acordo com Silva (2012), os reatores UASB possuem maior taxa de sucesso para a biodigestão anaeróbia da vinhaça in natura. Uma vez que, a vinhaça possui baixo teor de sólidos, permite seu bombeamento e recirculação no reator e, assim, um baixo tempo de residência hidráulico, diferente do que ocorre em outros biodigestores, como indiano e chinês.

O reator UASB funciona a partir da recirculação de vinhaça de baixo para cima, passando por uma manta fixa de microrganismos que se encontra no meio sendo responsáveis pela conversão da matéria orgânica presente no efluente em CH_4 e CO_2 . Na sua parte superior, há uma divisão que separa a fase líquida da gasosa, que permite o retorno da fase líquida para o reator e mantém fixa a manta de microrganismos. Por conseguinte, a fase gasosa (CH_4 e CO_2) é confinada com a ajuda de defletores que a leva a espaços localizados também na parte superior do reator (SILVA, 2012). Essas características podem ser observadas na Figura 5 (FREIRE E CORTES, 2000 apud Silva, 2012).

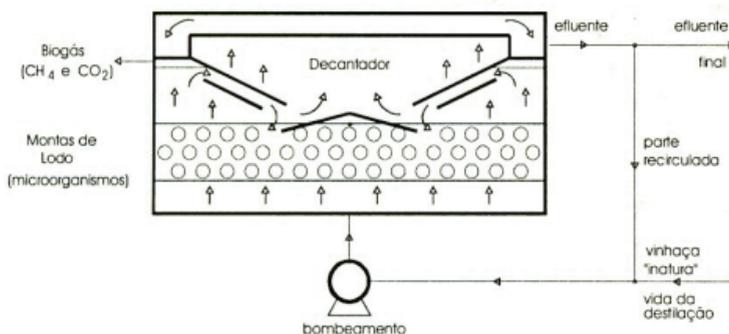


Figura 5 - Desenho Esquemático do Reator UASB

As principais vantagens do reator UASB foram apresentadas por Campos (1999), como sendo a produção de biogás rico em metano que pode ser utilizado como um bom substituto para outros combustíveis, como óleo diesel, energia elétrica, querosene e gás liquefeito de petróleo (GLP). Além de ser um sistema fácil de operação, possui baixo custo contratável e suporta altas taxas de cargas orgânicas.

Vale ressaltar que, o biogás não pode ser lançado diretamente na atmosfera, devido a presença do metano, que possui um Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potencial) de 28 GWP, medindo-se um período de tempo de 100 anos, de acordo com o IPCC (2014). Logo, contribui para o efeito estufa 28 vezes a mais que o gás carbônico. Desse modo, o biogás deve ser coletado, medido e utilizado ou queimado.

Dessa forma, dependendo da utilização do biogás é necessário realizar um processo de tratamento para sua purificação, pois a existência de substâncias não combustíveis, como água e dióxido de carbono, tornam o processo de queima menos eficiente, por absorverem parte da energia gerada, como afirma Costa (2006). Além disso, pode ocorrer a combustão incompleta, falta de alimentação, perda de potência e devido a presença do ácido sulfídrico a corrosão de equipamentos, diminuindo a vida útil do processo.

Por conseguinte, após a produção de biogás e o seu tratamento, é necessário que ocorra uma conversão energética de energia química para mecânica e finalmente elétrica. Há diversas tecnologias que fazem essa conversão energética:

- Motor de combustão interna

O motor de combustão interna realiza trabalho queimando uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro, sendo o trabalho mecânico gerado na transformação do movimento retilíneo do pistão em circular pelo virabrequim, conforme afirma Correa (2003 apud Figueiredo, 2007).

Os motores tipo Otto e Diesel já estão adaptados para o uso do biogás com diferentes teores de metano, dióxido de carbono e ácido sulfídrico. Além de serem capazes de fornecer pequenas e médias potências elétricas, sofrendo mínimas interferências com as condições ambientais, sendo os equipamentos mais utilizado para a queima do biogás devido a sua flexibilidade (FLAUSINIO, 2015).

- Turbina a gás

Nas turbinas a gás, a queima do combustível ocorre a partir da injeção de ar comprimido em uma câmara de combustão, provendo oxigênio necessário para o sistema. Desta forma, o gás formado exerce pressão sob um compressor e um gerador (FLAUSINIO, 2015).

As principais vantagens de utilização dessa tecnologia, com base em Santos (2009) são: os níveis baixos de ruídos e vibrações; flexibilidade na utilização do combustível, englobando o biogás; dimensões reduzidas e de fácil instalação; baixas emissões de NOx em micro-

turbinas e baixo custo de manutenção comparadas aos motores de ciclo Otto, de 3 a 10 US\$/MWh enquanto o ciclo otto 7 a 20 US\$/MWh.

E as principais desvantagens, ainda segundo Santos (2009), são: investimento inicial alto, por não ser fabricado no Brasil; alto custo de instalação; sistema rígido de limpeza do biogás e adaptação da turbina para esse combustível, por possuir um baixo poder calorífico.

- Células combustíveis

As células combustíveis são sistemas que convertem de forma direta a energia química da mistura combustível com agente oxidante em eletricidade, com elevada eficiência. Esse processo é semelhante à de uma bateria que é constantemente carregada envolvendo dois reagentes, o ar e a água.

Na Figura 6 (BERNAL et al.,2017), apresenta-se um esquema de uma usina completa de conversão energética do biogás produzido no tratamento da vinhaça a partir de um motor de combustão interna.

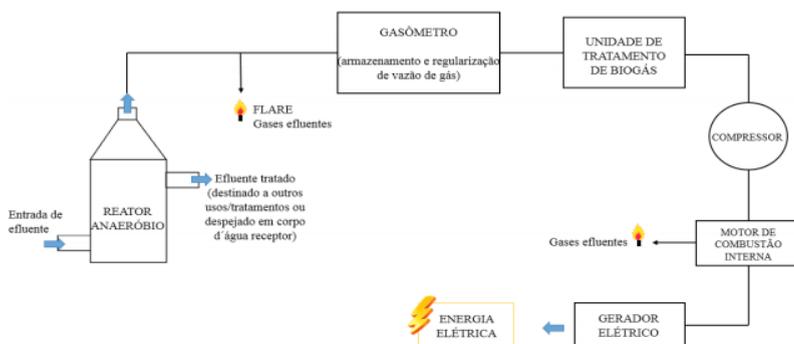


Figura 6 - Esquema representativo da geração de energia elétrica a partir da vinhaça

Nota-se, a partir da Figura 6, que além do reator anaeróbio, unidade de tratamento de biogás, conversor energético e gerador, citados anteriormente, se faz necessário um queimador, ou flare, gasômetro e compressor.

O queimador é utilizado para a combustão de gases não aproveitados para a geração da energia elétrica. O gasômetro é utilizado

para armazenar e regular a vazão de biogás, ele se encontra pressurizado, onde a pressão é mantida por um diafragma a 1,15 bar, de acordo com Bernal et al. (2017). O compressor utilizado para a coleta do gás e bombeamento pela tubulação de coleta.

6. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DA VINHAÇA

No Brasil, o potencial do biogás para ser instalado alcança um valor de 6,9 GW, que é equivalente a produção de energia de 48,72 TWh, de acordo com um estudo realizado por Santos et al. (2018), em que avaliou a geração de biogás de sete tipos de resíduos orgânicos (resíduos sólidos urbanos, águas residuárias, lodos originários dos tratamentos, vinhaça, e estrume de gado, porco e aves) a partir da digestão anaeróbica. O autor mostra que se essa energia fosse totalmente aproveitada representaria 9,33% da energia consumida do país, que é de 522,8 TWh no ano base de 2016 (EPE, 2017).

Porém, essa capacidade de geração de energia renovável não está sendo aplicada, visto que Santos et al. (2018) mostra que no Brasil, em janeiro de 2017, existem apenas 15 usinas de biogás, que produzem 114,7 MWh de energia, representando apenas 0,00024% da capacidade total de produção do país (48,72 TWh). Mostrando-se então, a grande disposição de crescimento desse setor e a capacidade de se gerar ganhos sistêmicos, como por exemplo, o bagaço da cana-de-açúcar apresenta a possibilidade de gerar energia nos períodos de redução dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN), de acordo com o Plano Nacional de Energia – PNE (2030).

Além disso, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2016), é esperado o aumento da participação de energias renováveis (além da energia hídrica) na distribuição de energia elétrica para, pelo menos, 23% até 2030, por meio do aumento das modalidades de energias eólica, biomassa e solar.

Levando-se então em conta os resíduos gerados pelo setor sucroalcooleiro, que possui 13% de área cultivada de cana-de-açúcar em relação a toda área utilizada para agricultura no Brasil - considerando a área plantada de cana-de-açúcar em 2017 de 10,2 milhões ha, de acordo com UNICA (s/d), e a área plantada total do Brasil de 79, 4 milhões ha na safra de 2017 (IBGE, 2018) - nota-se a capacidade de geração de biogás desse setor. Os principais aproveitamentos do biogás são: a queima para geração de vapor, substituição dos combustíveis no período de safra e geração de energia elétrica (GRANATO, 2003).

Assim, considerando a geração de energia elétrica pelo resíduo da vinhaça, que é um dos principais tipos de resíduos da indústria

sucroalcooleira, ele representa 4,21% da capacidade total de geração de energia elétrica se comparado com os diversos tipos de resíduos estudados por Santos et al. (2018), que equivale a 2,053 TWh, com potencial de biogás a ser instalado 292,979 MW no Brasil. Percebe-se a importância desse resíduo como um abastecedor de energia elétrica, visto seu potencial de biogás a ser instalado e o Brasil como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Ademais, vale ressaltar que as aplicações energéticas do biogás da vinhaça se devem a alta concentração de metano em sua composição. (SZYMANSKI, BALBINOT e SCHIRMER, 2010).

Por conseguinte, uma outra análise que pode ser feita é comparar o potencial de geração de energia elétrica da vinhaça no Brasil (2,053 TWh), encontrado por Santos et al. (2018), com o potencial de energia economicamente viável, obtido por Bernal et al. (2017), que para usinas com destilarias anexas (produzem açúcar e etanol) alcança 0,72 TWh/ano e, em usinas com destilarias autônomas (produzem apenas etanol), alcança 1,51 TWh/ano. Assim, em destilarias anexas a geração de energia viável representa, aproximadamente, 35% do total e para autônomas, 75%, o que representa além de um ganho econômico e energético, um ganho ambiental quanto as emissões evitadas de CO₂, 0,42 MtCO₂/ano em anexas e 0,88 MtCO₂/ano em autônomas (BERNAL et al., 2017).

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho revisou os principais aspectos ligados à indústria sucroalcooleira brasileira com enfoque na produção de resíduos e no potencial de produção de energia. A indústria sucroalcooleira é historicamente importante para a economia brasileira e dois dos seus resíduos possuem elevado potencial energético: a vinhaça e o bagaço.

Somente 17% do bagaço atualmente gerado é usado para geração de energia. Mesmo assim, ele já representa aproximadamente 16% da matriz elétrica Brasileira, sendo a principal biomassa utilizada para geração elétrica no país, mas com um potencial de crescimento ainda muito elevado. A vinhaça pode ser submetida a processo de digestão anaeróbia apresentando potencial altíssimo de produção de biogás em todo país. Este biogás pode ser utilizado para suprimento de milhares de ônibus no país ou para geração de eletricidade, podendo alcançar 0,35% de toda eletricidade consumida no país.

Além da geração de energia, benefícios ambientais seriam obtidos da utilização destes resíduos para geração energética, tais como: diminuição de emissão de gases de efeito estufa, disposição adequada destes resíduos e ampliação do valor agregado das usinas de álcool no

país. Faz-se, então, necessário o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem o uso destes resíduos, principalmente da vinhaça cujo uso é incipiente, para geração de energia no país.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de mestrado a aluna Hellen Luísa de Castro e Silva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMANÇA, R. Avaliação do uso da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia Elétrica (Estudo de caso). Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

ARAÚJO, E. S.; SANTOS, J. A. P. O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no Brasil e sua relevância na economia nacional. *Facider, Colíder*, v. 4, n. 34342, p.1-16, 2012. Disponível em: <<http://seicesucol.edu.br/revista/index.php/facider/article/view/37/87>>. Acesso em: 20 maio 2018.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). 2017. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2017>>. Acesso em 14 ago. 2018.

BRASIL. Resolução CIMA nº 1 de 4 de março. 2015. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=281774>>. Acesso em 17 ago. 2018

BENETTI, Maria Domingues. A internacionalização recente da indústria de etanol brasileira. *Revistas Eletrônicas FEE*, Porto Alegre, v. 36, n.04, 2009. Disponível em:< <https://revistas.fee.tche.br/index.php/indicadores/article/view/2220/2620>>. Acesso em 20 maio 2018.

BERNAL, A. P. et al. Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 151, n.º p. 260-271, 2017.

BIOMASSA & BIOENERGIA. Biomassa da cana-de-açúcar tem potencial para se tornar a principal fonte de geração de energia elétrica em SP. 2016. Disponível em: <https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/biomassa-da-cana-de-acucar-tem-potencial-para-se-tornar-a-principal-fonte-de/20161003-112254-o741>. Acesso em 6 Jul 2020.

BRASKEM. O Etanol. 2020. Disponível em: <http://plasticoverde.braskem.com.br/site.aspx/Etanol>. Acesso em 6 Jul. 2020.

CAMPOS, J.R. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 464 p., 1999.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Análise mensal – Cana-de-açúcar. 2018. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-cana-de-acucar/item/download/20421_e2fdda01edf58ef65e7f0a97656a3422. Acesso em 18 ago. 2018.

CORAZZA, R. I. Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lockin na fertirrigação? In: CORTEZ, L.; FREIRE, W. J.; ROSILLO-CALLE, E. Biodigestion of vinasse in Brazil. International Sugar Journal, Londres, v. 100, n. 1196, p.408-413, 1998.

CORREA, A. S. A influência da folga de válvulas na geração de ruído e vibração no motor fire 999cc 8v. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

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, 2006.

CORRÊA NETO, V.; RAMON, D. Análises de opções tecnológicas para projetos de cogeração no setor sucroalcooleiro. Vibhava Consultoria Empresarial S/C Ltda. SETAP Brazil Representation. 2002. Disponível em: http://www.nuca.ie.ufrj.br/infosucro/biblioteca/bim_CorreaNeto_OpcoesCogeracao.pdf. Acesso em 29 ago. 2018.

FLAUSINIO, B. F. P. G. Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de minas gerais. 2015. Tese (Doutorado de Engenharia Nuclear e da Energia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FIGUEIREDO, N.J.V. Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – estudo de caso. 2007. Trabalho final de graduação (Curso de Engenharia Mecânica), Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2007.

FONSECA, T. T. A. Avaliação das influências climáticas na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. 2016. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <http://bdm.unb.br/handle/10483/16312>. Acesso em: 21 maio 2018.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; HAANDEL, A. V.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: CAMPOS, J.R. (Coord.). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 29-52.

GRANATO, E. F. Geração de Energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2003.

INVESTE SÃO PAULO - AGÊNCIA PAULISTA DE PROMOÇÃO DE EVENTOS E COMPETITIVIDADE. Cana-de-açúcar. 2018. Disponível em: <https://www.investe.sp.gov.br/setores-de-negocios/agronegocios/cana-de-acucar/>. Acesso em 22 maio. 2018.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Meyer, Leo]. Geneva, 151 p., 2014.

LINHARE, G. N. S.; ARAÚJO, V. O.; SILVA, D. J. A. Análise financeira da utilização do bagaço da cana-de-açúcar para cogeração de energia pela Raízen. Revista de Trabalhos Acadêmicos Lusófona, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p.42-55, 2018.

MARQUES, M. O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: SEGATO, S. V. et al. (Org.). Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, 2006. p. 369-375.

NOVACANA. Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas. [S.d]. Disponível em: <https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>. Acesso em 28 ago. 2018.

NOVACANA. As projeções de produção de cana, açúcar e etanol para a safra 2023/24 da Fiesp/MB Agro. 2016. Disponível em: < <https://www.novacana.com/estudos/projecoes-producao-cana-acucar-etanol-safra-2023-2024-fiesp-mb-agro>>. Acesso em: 12 ago. 2018.

OLIVEIRA, L.L.; NEVES, G. G.; WAITMAN, P. L. Estudo sobre cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. REGRAD, Marília, v. 10, n. 1, p 354 - 365, 2017.

POVEDA, M. M. R. Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

RODRIGUES, Romaira Guedes. Diversidade microbiana cultivável em processo industrial de produção de etanol. 2017. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologias Química e Biológica - Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2017.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora Ltda. 2013.

SANTOS, I. F. S. et al. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation & Recycling*, [s.l.], v. 131, p.54-63, 2018.

SANTOS, M. L. et al. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. *Química Nova*, Franca, v. 34, n. 3, p.507-501, jan. 2011.

SANTOS, N. S. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgotos de madre de Deus - Bahia. 2009. Dissertação (Mestrado profissional em tecnologias aplicáveis a bioenergia) – Faculdade de Tecnologia e Ciências, Salvador, 2009.

SILVA, M. D. Associação Brasileira de Medicina do Trabalho. Pulmão em alerta. 2013. Disponível em: <http://www.abmt.org.br/documento/Artigo_Bagacose.pdf>. Acesso em: 20 maio 2018.

SILVA, G. A. Avaliação das tecnologias de disposição de vinhaça de cana de açúcar quanto ao aspecto de desenvolvimento ambiental e econômico. 2012. Tese (Doutorado em Térmica e Fluidos) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.

SOUZA, Z. J. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

SOUZA, Z. J.; AZEVEDO, P. F. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 44, n. 2, p. 179-199, jun. 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032006000200002. Acesso em: 29 ago. 2018.

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. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, p. 901-912, 2010.