

## CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CACHAÇA EM MINAS GERAIS E O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA

Alexandre Sylvio Vieira da Costa Sylvio<sup>1</sup>

Daniela Cristina Souza Oliveira<sup>1</sup>

Marcus Henrique Canuto<sup>1</sup>

Arlete Barbosa Reis<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri*

DOI: 10.47168/rbe.v27i4.507

### RESUMO

A fabricação artesanal da cachaça é uma importante fonte de renda para pequenos e médios produtores agrícolas do estado de Minas Gerais. Na produção da bebida, um dos principais subprodutos gerados é a vinhaça, rica em nutrientes minerais como potássio, nitrogênio, fósforo, cálcio e magnésio, além de apresentar elevado teor de matéria orgânica, favorecendo sua utilização na fertirrigação de áreas cultivadas com cana. Por outro lado, a vinhaça possui um teor significativo de enxofre, baixo pH e alta Demanda Química de Oxigênio (DQO), tornando-a um produto de grande potencial poluidor. De modo geral, de 8 a 10 litros de vinhaça são gerados para cada litro de cachaça produzido. Dentre as técnicas de tratamento da vinhaça, a biodigestão anaeróbica é uma das mais eficientes, promovendo a redução dos poluentes orgânicos associados à geração de bioenergia através da produção do biogás. Logo, a produção de biogás a partir da vinhaça da cana-de-açúcar tem um enorme potencial associado a gestão econômica, energética e ambiental. O presente estudo tem como objetivo avaliar as potencialidades da aplicação da biodigestão anaeróbica no tratamento da vinhaça oriunda da fabricação de cachaça artesanal, no estado de Minas Gerais, contribuindo com informações que visam demonstrar a importância e vantagens desta técnica de obtenção de energia, o biogás. Se a totalidade da vinhaça gerada fosse utilizada na produção de biogás, a quantidade anual de metano produzido em Minas Gerais seria de aproximadamente 3,7 milhões de Nm<sup>3</sup>.

Palavras-chave: Vinhaça; Biodigestão anaeróbica; Metano; Bioenergia.

## ABSTRACT

The artisanal manufacture of cachaça is an important source of income for small and medium agricultural producers in the Brazilian state of Minas Gerais. In its production one of the main by-products is vinasse, rich in mineral nutrients such as potassium, nitrogen, phosphorus, calcium and magnesium. Besides, vinasse has a high content of organic matter, favoring its use in the fertigation of cane cultivated areas. On the other hand, vinasse has a significant sulfur content, low pH and high Chemical Oxygen Demand (COD) making it a product of great polluting potential. In general, 8 to 10 liters of vinasse are generated for each liter of cachaça produced. Among vinasse treatment techniques, anaerobic biodigestion is one of the most efficient, promoting the reduction of organic pollutants associated with the generation of bioenergy through the production of biogas. Therefore, the biogas production from sugarcane vinasse has enormous potential associated with economic, energy and environmental management. The present study aim to evaluate the potentialities of the application of anaerobic biodigestion in the treatment of vinasse from the manufacture of artisanal cachaça, in the Minas Gerais state, contributing with information that aims to demonstrate the importance and advantages of this technique. If all vinasse were used in the production of biogas, the annual amount of methane produced in Minas Gerais would be 3.7 million m<sup>3</sup>.

Palavras-chave: Vinasse; Biodigestion; Methane; Bioenergy.

## 1. INTRODUÇÃO

O setor agroindustrial gera resíduos em grandes quantidades. A destinação dos resíduos e efluentes é um dos principais desafios enfrentados pelo setor. Efluentes industriais com elevado conteúdo orgânico têm se caracterizado como uma importante fonte de contaminação. O tratamento e a disposição inadequada desses resíduos podem contaminar o solo e os recursos hídricos, favorecendo a proliferação de insetos e vetores de doenças, além da emissão de gases promotores do efeito estufa (INOVAGRID, 2017).

A cachaça é um produto nacional que apresenta importante papel econômico, social e cultural no país. Considerando sua importância, os produtores aprimoram o sistema produtivo visando agregar qualidade e valor à bebida, mantendo a sua competitividade (NOGUEIRA LIZ et al., 2016). A capacidade de produção instalada no Brasil é de, aproximadamente, 1,4 bilhão de litros de cachaça por ano. Apesar do grande potencial, uma ínfima quantidade da produção é exportada, apenas 1%. São aproximadamente 40 mil produtores comercializando quatro mil marcas, sendo 98% correspondentes a

pequenas e microempresas. Na produção de cachaça predomina o processo de coluna ou industrial, e 30% é cachaça de alambique. A cadeia de produção da cachaça movimentava anualmente valores próximos a 7 bilhões de reais e é responsável pela geração de 600 mil empregos diretos e indiretos (PAULO et al., 2016). Os estados que lideram a produção são Pernambuco, São Paulo, Ceará, Minas Gerais e Paraíba (IBRAC, 2019).

A produção de cachaça artesanal é uma das principais fontes de renda de pequenos e médios produtores de Minas Gerais. O estado é o principal produtor da bebida, responsável por 50% da produção nacional. Calcula-se a existência de 9.000 empresas produtoras no estado, produzindo aproximadamente 200 milhões de litros por ano (SEBRAE, 2013). Campelo (2002) descreve em seu artigo que 85% dessas empresas operam sem controle oficial e fiscalização adequadas, ou seja, sem registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Dos empreendimentos do setor em Minas Gerais, mais da metade estão localizados nas mesorregiões do Norte de Minas, Vale do Jequitinhonha e Mucuri, demonstrando a grande influência das regiões. A produção de cachaça é responsável pela geração de renda e emprego em regiões pobres do estado (BORGES & TAKEMOTO, 2019).

As etapas da produção de cachaça envolvem corte de cana-de-açúcar, moagem, diluição do caldo, fermentação e destilação. Do processo de destilação da cachaça resulta um subproduto que fica retido na panela do alambique, a vinhaça, ou vinhoto (CAMPOS, 2009). Para cada litro de cachaça produzida tem-se de 8 a 10 litros de vinhaça (OLIVEIRA et al., 2009). A vinhaça é um dos principais resíduos gerados nas indústrias sucroalcooleiras, com elevado potencial poluidor (LAMONICA, 2006).

A vinhaça pode ser usada como fertilizante, embora o seu uso ou descarte incorreto apresente uma séria ameaça ao meio ambiente, devido principalmente ao seu alto conteúdo orgânico (MORAES et al., 2017). Por outro lado, possui um elevado potencial energético, como biogás, que é composto principalmente por metano (BARROS et al., 2017)

A digestão anaeróbia, é um processo microbiológico com ampla utilização na conversão de resíduos e efluentes orgânicos em biogás. A biodigestão da vinhaça tem como produto final biogás e biofertilizante com reduzida carga orgânica, mas sem alterar suas características fertilizantes (LAMONICA, 2006). O emprego do efluente tratado, como fertilizante, diminui o uso de fontes químicas inorgânicas e concentradas, reduzindo os custos de produção dos sistemas agropecuários (BRAMLEY et al., 2011).

O objetivo deste trabalho é analisar o potencial da produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbica da vinhaça, oriunda da fabri-

cação de cachaça nas propriedades rurais no estado de Minas Gerais

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa bibliográfica foi realizada tendo como descritores a produção de cachaça artesanal, sistemas de biodigestão anaeróbica e aproveitamento energético do biogás. As principais bases de dados foram pesquisadas para identificação de livros e periódicos nacionais e internacionais. Também foram pesquisadas as páginas web de instituições como o MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente, ANP – Agência Nacional de Petróleo, SIAM – Sistema Integrado de Informação Ambiental. A partir dos dados coletados, e com as informações da produção de cachaça e geração de vinhaça no estado de Minas Gerais, foi possível avaliar o potencial da região para produzir biogás a partir do resíduo. As pesquisas eletrônicas ocorreram no período de outubro a dezembro de 2019.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Cachaça artesanal e aguardente

O Decreto nº 6.871, de 2009, que Regulamenta a Lei nº 8.918, de 1994, dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. O artigo 51 apresenta a seguinte definição para aguardente:

Aguardente de Cana é a bebida com graduação alcoólica de 38% vol. a 54% vol. a 20°C, obtida do destilado alcoólico simples de cana-de-açúcar ou pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar, podendo ser adicionada de açúcares até 6 g . L-1 , expressos em sacarose (BRASIL, 2009).

Já o artigo 53 define cachaça da seguinte forma:

Cachaça é a denominação típica e exclusiva da Aguardente de Cana produzida no Brasil, com graduação alcoólica de 38% V/V a 48% V/V a 20°C, obtida pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar com características sensoriais peculiares, podendo ser adicionada de açúcares até 6 g . L-1 , expressos em sacarose (BRASIL, 2009).

Existem duas tecnologias para a produção da cachaça: a tecnologia industrial, implementada nas empresas com sistemas e

equipamentos modernos, e a produção artesanal, tecnologia geralmente adotada em empresas familiares, com volume de produção reduzido, cujos processos são vinculados às tradições da região. Em 2008, no estado de Minas Gerais aproximadamente 90% da cachaça foi produzida utilizando tecnologias industriais, e o restante no sistema artesanal, também denominada cachaça de alambique (SILVA, 2009).

O principal fator que distingue o produto produzido industrialmente e o artesanal está associado ao seu sistema de produção. A produção de cachaça artesanal utiliza alambiques de cobre, e em bateladas. O equipamento é totalmente preenchido com o mosto, seguido de destilação e esvaziamento completo. No sistema em batelada são produzidas pequenas quantidades por ciclo. Na produção de aguardente de cana que utiliza sistema industrial são empregadas colunas de aço inoxidável e o fluxo é constante. Ocorre a entrada do mosto fermentado no sistema e ao final do processo ocorre a saída da cachaça destilada (processo contínuo), otimizando o sistema de produção da bebida. No processo contínuo a quantidade da bebida produzida é elevada, o que é característico do processo industrial (FEIJÓ e MACIEL, 2002; FEITOSA, 2005; TAVARES, 2010).

Em Minas Gerais, a cachaça artesanal é caracterizada conforme a Lei Estadual Nº 13.949, de 11 de julho de 2001 e regulamentada pelo Decreto 42.644, de 5 de junho de 2002, como Cachaça de Minas, conforme descrito no texto abaixo:

Cachaça de Alambique é a bebida com graduação alcoólica de 38% a 54% V/V, à temperatura de 20°C, obtida pela destilação do mosto fermentado de cana-de-açúcar, em alambique de cobre, sem adição de açúcar, corante ou outro ingrediente qualquer. A Cachaça de Minas corresponde à fração denominada “coração”, que vem a ser a parte destilada, de mais ou menos 80% do volume total que fica entre as frações “cabeça” e “cauda”, ou “água fraca”.

### **3.2 Panorama socioeconômico da indústria de aguardente e cachaça artesanal**

#### **3.2.1 Estabelecimentos produtores de aguardente e cachaça artesanal no Brasil e em Minas Gerais**

A cachaça, uma bebida genuinamente brasileira, originou-se nos engenhos de cana no período do Brasil Colônia, em meados do século XVI. Com o passar dos séculos houve crescimento no consumo tanto no mercado nacional quanto internacional. Segundo a ABRABE (2015), a bebida ocupa a terceira posição no ranking mundial no mercado de destilados e o segundo lugar no mercado de bebidas alco-

ólicas no Brasil, liderado atualmente pela cerveja.

Na Tabela 1, os dados do Censo Agropecuário de 2017, divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, mostram a existência de 11.028 mil estabelecimentos produtores de cachaça e aguardente de cana-de-açúcar no Brasil, com 8.664 estabelecimentos caracterizados nos modelos de agricultura familiar. O total está próximo do levantamento anterior, realizado em 2006 pelo IBGE, com 11.124 estabelecimentos produtores. Segundo o IBRAC (2019), com as estimativas obtidas das associações regionais, o número de estabelecimentos produtores é de aproximadamente 15 mil.

Tabela 1- Número de estabelecimentos agropecuários produtores de aguardente de cana e cachaça

UF	Número de Estabelecimentos		
	Total	Agricultura não familiar	Agricultura familiar
Rondônia	6	1	5
Acre	5	1	4
Amazonas	16	-	16
Pará	5	2	3
Tocantins	23	7	16
Maranhão	496	95	401
Piauí	271	49	222
Ceará	155	38	117
Rio Grande do Norte	5	4	1
Paraíba	41	32	9
Pernambuco	5	3	2
Alagoas	7	3	4
Sergipe	3	3	-
Bahia	2.890	376	2.514
Minas Gerais	5.512	1.414	4.098
Espírito Santo	147	49	98
Rio de Janeiro	104	51	53
São Paulo	196	82	114
Paraná	90	25	65
Santa Catarina	359	46	313
Rio Grande do Sul	591	58	533

Tabela 1- Número de estabelecimentos agropecuários produtores de aguardente de cana e cachaça (continuação)

UF	Número de Estabelecimentos		
	Total	Agricultura não familiar	Agricultura familiar
Mato Grosso do Sul	2	1	1
Mato Grosso	9	4	5
Goiás	87	19	68
Distrito Federal	3	1	2
<b>Brasil</b>	<b>11.028</b>	<b>2.364</b>	<b>8.664</b>

O estado de Minas Gerais possui 5.512 (49,98%) estabelecimentos produtores de aguardente e cachaça (Tabela 1), com 4.098 (74,34%) estabelecimentos caracterizados como agricultura familiar. Bahia, Rio Grande do Sul e Maranhão possuem, respectivamente, 26,2%, 5,36% e 4,5% do total de estabelecimentos. Entretanto, os dados informados pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), divulgados no Anuário da Cachaça de 2019, indicam a existência de 1.562 produtores formais de cachaça no país. Segundo o levantamento realizado em 2018, os estabelecimentos produtores de cachaça registrados no Brasil totalizam 951 e os de aguardente 611.

Considerando os números informados pelo IBGE e pelo MAPA, pode-se observar que há uma elevada taxa de informalidade no setor, aproximadamente 86% dos estabelecimentos produtores da bebida. Campelo (2002) afirma em seu trabalho que 85% das unidades produtoras atuam nas informalidade, sem registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Os dados divulgados pelo MAPA (BRASIL, 2019), apresentados na Figura 1, apontam liderança absoluta do estado de Minas Gerais na produção de cachaça. Na sequência aparecem os estados de São Paulo, Espírito Santo e Rio de Janeiro, caracterizando a concentração da produção de cachaça na região Sudeste, representando mais de 70% da produção nacional. Segundo o MAPA, a região Nordeste apresenta 14,5%, a região Sul 10,4%, a região Centro-Oeste 3,5% e, por fim, a região Norte, com 1,05%, das empresas do setor. Em relação ao número de estabelecimentos produtores de aguardente no Brasil registrados no MAPA, conforme Figura 2, a região Sudeste possui 290 desses empreendimentos, a região Nordeste 184, a região Sul 96, o Centro-Oeste 25 e a região Norte tem 16 empreendimentos produtores de aguardente registrados, correspondendo, respectivamente, 47,5%, 30,1%, 15,7%, 4,1% e 2,6% do total.

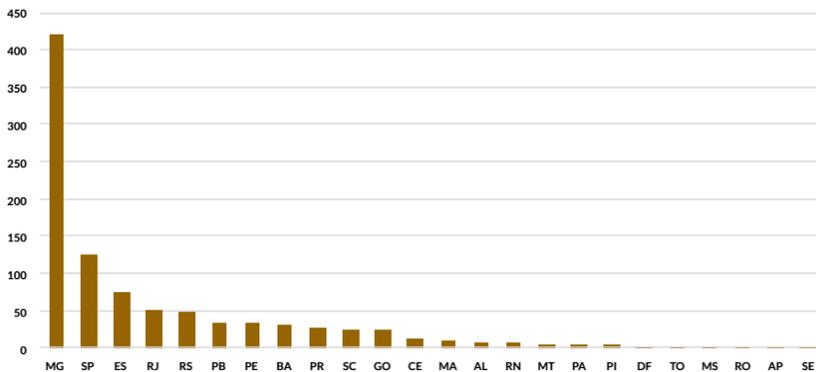


Figura 1 - Registros de estabelecimentos produtores de cachaça por estado

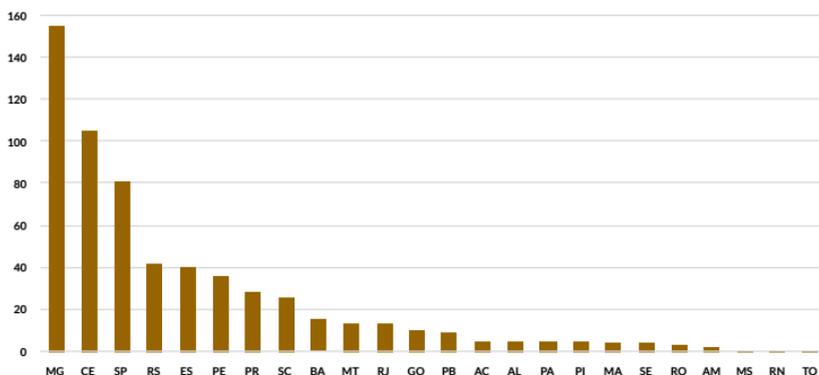


Figura 2 - Registros de estabelecimentos produtores de aguardente por estado

Há diferenças significativas entre as informações do IBGE e do Anuário da Cachaça de 2019, do MAPA. O estado do Maranhão por exemplo é reportado pelo MAPA com menos de 20 empresas de cachaça e aguardente, entretanto, segundo o Censo Agropecuário, o estado possui 496 estabelecimentos. A Bahia é outro estado em que a discrepância indica elevada quantidade de empresas na informalidade. O IBGE registrou 2.890 estabelecimentos produzindo a bebida, mas o estado tem, segundo o MAPA, 30 empresas registradas produzindo ca-

chaça e 15 empresas produzindo aguardente, totalizando 45 empresas, apenas 1,56% do total.

### 3.2.2. Produção de aguardente e cachaça artesanal no Brasil e em Minas Gerais

O estado de São Paulo é o maior produtor de cachaça industrial, enquanto no estado de Minas Gerais prevalece a produção de cachaça artesanal, totalizando aproximadamente 200 milhões de litros por ano (NIGRI et al., 2011). Do total de produtores mineiros, 98% correspondem a pequenas e microempresas.

A produção de cachaça artesanal é uma importante geradora de renda para os pequenos produtores e agricultores familiares, que atendem principalmente ao mercado doméstico (SILVA, 2009). Mesmo sendo a padronização do produto final uma característica positiva da cachaça industrial, quando comparado com a artesanal, e item básico para uma bebida de exportação, a cachaça artesanal tem ocupado uma fatia do mercado internacional por conta de seu aroma mais complexo e peculiar, alcançando preços maiores. Segundo a Federação Nacional das Associações de Produtores de Cachaça de Alambique, FENACA, há alguns anos a cachaça industrial era comercializada com preços médios seis vezes inferiores aos da artesanal (TAVARES, 2010; VERDI, 2006).

Na Tabela 2 (IBGE - Censo Agropecuário 2017) são apresentadas as produções de cachaça e aguardente em 2017, originária da agricultura familiar ou não. Dos 83,4 milhões de litros produzidos, segundo o IBGE (2017), 50 milhões (60,02%) foram originários das médias a grandes propriedades rurais, enquanto 33,34 milhões de litros (39,98%) de pequenos produtores e da agricultura familiar. Quando analisamos os estados individualmente, observamos uma grande discrepância na produção de aguardente e cachaça entre os produtores com maior extensão de terras e a agricultura familiar. Enquanto estados como São Paulo e Paraná apresentam predominância da produção associada aos médios e grandes produtores, estados como Santa Catarina e Rio Grande do Sul apresentam distribuição oposta, com predominância da produção pelos agricultores familiares. No estado de Minas Gerais verifica-se um equilíbrio na produção entre os segmentos avaliados. Entre os estados do Nordeste brasileiro também verificamos grandes diferenças. Enquanto no estado da Paraíba, praticamente toda bebida é produzida por médios e grandes produtores, nos estados da Bahia, Piauí e Maranhão o predomínio da produção está na agricultura familiar. Essas diferenças são decorrentes de diversos fatores, mas predominantemente pelo modelo de incentivo oferecido pelos governos estaduais às classes de produtores.

Tabela 2 - Quantidade produzida de aguardente de cana/cachaça na agroindústria rural

UF	Quantidade produzida de aguardente de cana/cachaça (Mil litros)		
	Total	Agricultura não familiar	Agricultura familiar
Rondônia	24	X	X
Acre	10	X	X
Amazonas	6	-	6
Roraima	-	-	-
Pará	44	X	X
Amapá	-	-	-
Tocantins	128	68	60
Maranhão	2.825	959	1.867
Piauí	1.068	269	799
Ceará	1.094	821	272
Rio Grande do Norte	10.047	X	X
Paraíba	3.575	3.551	25
Pernambuco	37	X	X
Alagoas	90	66	25
Sergipe	240	240	-
Bahia	7.696	2.465	5.231
Minas Gerais	38.188	19.546	18.642
Espírito Santo	3.668	2.873	795
Rio de Janeiro	1117	933	184
São Paulo	7.122	5.639	1.484
Paraná	1.683	1.319	365
Santa Catarina	1.656	285	1.371
Rio Grande do Sul	1.930	271	1.659
Mato Grosso do Sul	X	X	X
Mato Grosso	168	140	28
Goias	968	485	484
Distrito Federal	11	X	X
<b>Brasil</b>	<b>83.409</b>	<b>50.067</b>	<b>33.342</b>

X - Não caracterizado

### 3.3 Processo produtivo da cachaça artesanal

A cadeia produtiva completa da cachaça artesanal se caracteriza pelas etapas de plantio e colheita da cana de açúcar, recepção e armazenamento do material colhido, pré-limpeza e preparo, extração do caldo, fermentação, destilação, armazenamento, envelhecimento e envase. No processo de produção da cachaça, vários fatores contribuem para a variação da qualidade da bebida (SILVA et al., 2020).

Na extração do caldo da cana, a moagem, ocorre no moinho. Na sequência o caldo é submetido ao processo de decantação para purificação, com a retirada das impurezas e sua diluição. Segundo os modelos tradicionais de produção da cachaça o caldo de cana-de-açúcar obtido ao final do processo deve ser livre de impurezas. Na sequência do processo produtivo, o caldo é diluído até que o teor de sólidos solúveis alcance entre 14-16°Brix (BARBOSA, 2013).

A fermentação é considerada uma das operações mais importantes do processo produtivo, pois influencia diretamente na composição química e sensorial da bebida. Durante a etapa de fermentação, são produzidos os constituintes químicos que caracterizarão a bebida (CARDOSO, 2013). A fermentação é um processo de oxidação anaeróbica parcial da glicose. Pela via glicolítica, a glicose é convertida em duas moléculas de piruvato através de reações catalisadas por diferentes enzimas. As moléculas de piruvato, sob condições anaeróbicas, são descarboxiladas pela atividade da enzima piruvato descarboxilase originando duas moléculas de acetaldeído e duas de gás carbônico. As moléculas de acetaldeído são reduzidas a etanol pela enzima álcool desidrogenase (CARDOSO, 2006).

Após o processo de fermentação, o caldo é destilado em alambique de cobre. A destilação é classificada como um processo físico que otimiza separações químicas. O processo separa os compostos orgânicos de acordo com as temperaturas de ebulição, promovendo a mudança de fase dos componentes. O material fermentado possui composição complexa apresentando componentes sólidos (açúcares não fermentados, sais minerais, substâncias nitrogenadas, pectina, células e bactérias, bagacilho e argila), água e etanol (representando 99% do total), e gasosos (principalmente gás carbônico). Com a destilação obtém-se o flegma (frações “cabeça”, “coração” e “cauda”) e o material denominado vinhaça, também conhecida como vinhoto ou restilo (YOKODA, 1995). Por meio da destilação, o produto comercial final proveniente da fermentação alcoólica, com aproximadamente 8% em volume de álcool etílico, deverá produzir 15 a 17% do volume do destilado em cachaça contendo de 38 a 48% de volume em álcool (MAIA e CAMPELO, 2006).

A última etapa no processo de produção da cachaça é o seu envelhecimento, processo que consiste na reação química que ocorre nos componentes secundários da cachaça. As características específicas que a bebida adquire com o envelhecimento são desenvolvidas principalmente pela formação dos ésteres que ocorrem de maneira lenta e contínua. O envelhecimento é realizado em barris de madeira com características específicas, que facilitam o processo de oxidação pelas trocas gasosas que ocorrem através dos poros da madeira (CARDOSO, 2006).

Analisando a produção da bebida sob o ponto de vista ambiental, a fabricação de cachaça é uma atividade com alto potencial poluidor em relação aos efluentes líquidos, sendo a vinhaça o resíduo gerado em maior quantidade no processo de destilação do mosto fermentado (FEAM, 2016).

### **3.4 Características da vinhaça**

A vinhaça pode ser definida como o resíduo final obtido durante o processo de fermentação que ocorre na produção de etanol (BARROS et al., 2017). Esse resíduo é caracterizado pelas acidez, elevados valores de DQO e DBO, odor intenso e matiz marrom escuro (CHRISTOFOLETTI et al., 2013; ESPANA-GAMBOA et al., 2011). Em função dessas características, a vinhaça apresenta elevada carga poluidora, reduzido pH e é composta por água e nutrientes como potássio, nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio (94 a 97%). (PINTO et al., 2018).

Segundo as informações da produção nacional de etanol (UNICA, 2013), estima-se que a produção de vinhaça no Brasil, pode atingir valores em torno de 250 milhões de m<sup>3</sup> por ano (MORAES et al., 2015). Segundo Moraes et al. (2017), entre 1,0 e 1,7 milhão de m<sup>3</sup> de vinhaça são reciclados no país, sendo utilizada na fertirrigação de campos de cana-de-açúcar.

As características físico-químicas da vinhaça estão intimamente associadas à matéria-prima utilizada no processo e às condições de processamento, que incluem fermentação e destilação (ESPANA-GAMBOA et al., 2012). A composição química da vinhaça depende das características do solo onde a cana foi cultivada, da variedade de cana utilizada, do período da safra e do processo industrial usado na produção do etanol. Oliveira (2012) também descreve a grande variação da composição química da vinhaça em função dos diversos fatores que envolvem a cadeia de produção da cachaça.

No Brasil, a vinhaça de cana-de-açúcar é comumente aplicada nos canaviais via fertirrigação visando a reciclagem de água, matéria orgânica e nutrientes, com atenção especial para o potássio (FUESS e

GARCIA, 2014). Embora diversos trabalhos demonstrem resultados benéficos no processo de fertirrigação (JIANG et al., 2012; SIVALOGANATHAN et al., 2013), incluindo redução de gastos com fertilizantes inorgânicos, a disposição desse material no solo pode gerar diversos impactos negativos para o sistema solo-planta no longo prazo (DE OLIVEIRA et al., 2013). A aplicação direta da vinhaça no solo reflete a subutilização de uma matéria-prima de alto teor energético. As abordagens biotecnológicas são potencialmente adequadas para o processamento desses efluentes, particularmente por meio de processos microbiológicos anaeróbios (FUESS et al., 2018).

A utilização da vinhaça in natura como fertilizante causa preocupação devido ao seu elevado potencial de impacto no meio ambiente, principalmente devido ao reduzido pH e elevada demanda química de oxigênio (DQO). A DQO pode reduzir os níveis de oxigênio, afetando a atividade dos organismos aeróbicos presentes no solo (DAMIANO, 2005). Barros et al. (2009) descrevem que a carga de DQO da vinhaça é cerca de 27.000 mg.L<sup>-1</sup>, e ao atingir os cursos d'água pode impactar a fauna e a flora também devido a redução do oxigênio.

A vinhaça, em função de suas características físico-químicas, possui grande potencial para a produção de biogás, embora a sua utilização nesse contexto seja atualmente subexplorada. A vinhaça é também manejada como um aditivo para alimentação animal. O seu uso continuado como fertilizante no solo gerou preocupações com os potenciais impactos ambientais nas águas superficiais e subterrâneas, resultando na proibição do uso de vinhaça como fertilizante nos Estados Unidos e no Uruguai. Apesar das restrições de uso da vinhaça em alguns países, a sua aplicação ainda é recomendada no Brasil, na União Europeia e no Canadá.

Segundo Oliveira (2019), o processo de biodigestão da vinhaça mostrou-se eficiente não apenas em relação ao volume de gás gerado mas também na redução da carga orgânica do resíduo final com a DQO (Demanda Química de Oxigênio) reduzido em 74%. Resultados semelhantes na redução da DQO foram obtidos por Souza et al. (1992), com valores de 72% na eficiência da redução da DQO após a biodigestão da vinhaça.

### **3.5 Digestão anaeróbica**

A digestão anaeróbica é um processo com extensa aplicação na conversão de resíduos e efluentes orgânicos em biogás. A biodigestão é comum utilizando como matéria prima resíduos rurais, como o esterco, agroindustriais (vinhaça, efluentes das indústrias de laticínios e dos matadouros), domésticos ou comunitários (lama de esgotos) e materiais vegetais, como o aguapé (MALAJOVICH, 2012; TUNES, 2017).

O processo de biodigestão anaeróbica é classificado como biológico, no qual microrganismos interagem promovendo a transformação de compostos orgânicos complexos em compostos simples, gerando como produto final principalmente metano e dióxido de carbono, além de outros gases, como amônia e gás sulfídrico. Além do biogás, o efluente resultante é um biofertilizante (MORAES et al., 2015). Neves (2015) corrobora as informações citando que o processo permite o tratamento de resíduos com elevada carga orgânica de forma a reduzir o volume final, produzindo um biofertilizante com elevada concentração de nutrientes além de gás combustível.

No processo de transformação anaeróbica da matéria orgânica são identificadas quatro etapas principais, de acordo com as reações bioquímicas às quais os compostos orgânicos são submetidos: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cinco grupos de microrganismos participam do processo (FUESS, 2017).

Os microrganismos (bactérias acidogênicas, bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas) são responsáveis por etapas do processo e devem estar em equilíbrio para a produção de biogás (KOTHARI et al., 2014). Os microrganismos fermentativos iniciam o complexo processo de decomposição dos substratos e geram o maior benefício energético (MORAES et al., 2015).

A primeira etapa do processo de digestão anaeróbica é a hidrólise dos polímeros de cadeia longa, realizada pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Devido à impossibilidade das bactérias absorverem e assimilarem a matéria orgânica particulada, inicialmente ocorre a hidrólise dos materiais complexos, os polímeros, em materiais mais simples de cadeias reduzidas. Os principais compostos hidrolisados no processo inicial de transformação são a celulose, as proteínas e os lipídios. A hidrólise desses polímeros complexos, alguns de baixa solubilidade, é catalisada por enzimas extracelulares que são excretadas pelas bactérias fermentativas como as proteases e lipases (CASTRO e SILVA, 2014).

No processo de acidogênese as bactérias acidogênicas convertem os produtos da hidrólise da matéria orgânica em ácidos orgânicos voláteis, sendo os principais o ácido acético, propiônico e butírico, além da produção de álcoois, corpos cetônicos, dióxido de carbono e hidrogênio. As reações biológicas são termodinamicamente favoráveis reduzindo o tempo de geração e elevando as taxas de crescimento dos microrganismos. A acidogênese tem a sua atividade limitada apenas se o substrato a ser degradado não for prontamente hidrolisado (MORAES et al., 2015).

Na acetogênese, terceira etapa do processo de decomposição, as bactérias acetogênicas transformam ácidos orgânicos e álcoois em ácido acético, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> (FUESS, 2017). Na etapa final, na me-

tanogênese, o acetato, hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos em gás metano e dióxido de carbono, através da ação dos microrganismos metanogênicos, também denominadas arqueas metanogênicas, responsáveis pela finalização do processo (TUNES, 2017).

### **3.6 Produção de biogás a partir de vinhaça da fabricação de cachaça**

A utilização da digestão anaeróbica no tratamento da vinhaça de alta carga orgânica está associada ao aperfeiçoamento do processo ocorrido nas últimas décadas, com o desenvolvimento de tecnologias que otimizam o tempo de retenção de sólidos (biomassa) nos reatores (VAN LIER et al., 2015).

Na indústria produtora de etanol a utilização da biodigestão anaeróbica tem restrições, porque o uso do biogás na geração de eletricidade não é competitiva em relação aos sistemas de cogeração convencionais (GRANATO e SILVA, 2002). O avanço científico nessa área ainda é insatisfatório, com vários estudos conflitantes, pois há resultados que indicam vantagens do uso do biogás na geração de eletricidade e como combustível veicular. O potencial energético da vinhaça pode ser comparado às demandas elétricas de algumas pequenas cidades. Considerando esses aspectos, os conceitos de sustentabilidade envolvidos na biodigestão anaeróbica da vinhaça necessitam ser explorados de forma mais intensa nas biorefinarias de cana-de-açúcar (MORAES et al., 2015).

Granato (2003) avaliou o potencial de geração de energia elétrica pela queima do biogás oriundo da biodigestão anaeróbica da vinhaça em uma usina de etanol. Verificou que a energia elétrica potencial gerada no processo pode promover uma redução média de 62,7% na aquisição de energia elétrica pela usina. Segundo Pompermayer e Paula Júnior (2003), em um dos modelos testados para produção de biogás e geração de energia da biodigestão da vinhaça, os custos de produção variaram entre 63 US\$/tEP e 129 US\$/tEP. Em comparação ao uso de outros combustíveis, como óleo combustível, gás natural, GLP e carvão vapor, com custo médio de 150 US\$/tEP, 103 US\$/tEP, 203 US\$/tEP e 26 US\$/tEP, respectivamente, verifica-se que o custo da utilização do biogás da vinhaça é, em média, inferior as fontes estudadas, com exceção do carvão a vapor.

Os benefícios da digestão anaeróbica da vinhaça incluem baixa geração de lodo biológico, a reciclagem de nutrientes e a produção de hidrogênio e metano, que podem ser utilizados energeticamente. O processo enquadra-se no conceito de biorrefinarias, integrando a produção de etanol, a recuperação energética e o uso do efluente gerado no processo na fertirrigação de plantações de cana-de-açúcar e outras culturas (VOLPINI et al., 2018).

Para as pequenas indústrias, Satyawali e Balakrishnan (2008) descrevem que o modelo de reatores em batelada é uma técnica promissora no tratamento da vinhaça, sendo a instalação composta por um tanque receptor, um tanque de retenção intermediária, dois tanques de armazenamento e um tanque de tratamento aeróbio.

### **3.7 Potencial de produção de biogás de vinhaça de cachaça em MG**

O estado de Minas Gerais possui uma vocação agroindustrial forte, porém ainda em trajetória de expansão, o que tornam relevantes as oportunidades no sentido de otimizar o setor de produção de cachaça e aguardente (CRUZ et al., 2010).

Com os dados referentes aos processos de regularização ambiental no estado de Minas Gerais, disponíveis no Sistema Integrado de Informações Ambientais (SIAM) que é vinculado à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), foi elaborado um perfil da agroindústria mineira com potencial de geração de biogás. Foram avaliadas 44 atividades consideradas relevantes para a produção de biogás, considerando a geração de resíduos e efluentes com elevado conteúdo orgânico biodegradável. Entre as atividades analisadas estão as usinas processadoras de cana-de-açúcar e a indústria de fabricação de bebidas. Quanto à fabricação de bebidas, verificou-se que a maior parte dos empreendimentos está relacionada à produção de aguardente (1.027 ou 88% do total), e que possuem um significativo potencial de produção de biogás. A maioria dos empreendimentos é de pequeno porte, o que tende a direcionar a utilização do biogás para geração de energia térmica destinada ao próprio consumo, por ser uma alternativa com melhor viabilidade econômica para aplicação em projetos de pequena escala (FEAM, 2015).

Neste contexto, a implementação de empreendimentos geradores de biogás torna-se potencialmente positivo para a agroindústria do estado considerando sua adequação ambiental além de contribuir com o atendimento da demanda de energia com fontes renováveis. A implementação de tecnologias adaptadas como a biodigestão pode permitir a identificação do parque industrial mineiro com práticas sustentáveis, melhor eficiência de seu sistema produtivo e a competitividade tanto no cenário nacional quanto internacional (FEAM, 2015).

A produção de um litro de cachaça gera, em média, 14 litros de vinhaça e, de acordo com os dados de Johansson et al. (1992), 1,0 m<sup>3</sup> de vinhaça tem potencial para produzir 14,23 m<sup>3</sup> de metano. Com estas informações podemos estimar a quantidade de biogás que pode ser gerado a partir de vinhaça de cachaça, no estado de Minas Gerais, conforme apresentado na Tabela 3 (ABRABE, 2015).

Tabela 3 - Estimativa da produção de biogás em Minas Gerais

Quantidade de cachaça produzida em Minas Gerias	38.188 m <sup>3</sup>
Quantidade de vinhaça gerada (relação 1:14)	534.632 m <sup>3</sup> de vinhaça
Volume de biogás estimado	7.607.813,37 Nm <sup>3</sup>
Volume de biogás estimado para a agricultura familiar	3.713.859,24 Nm <sup>3</sup>

O potencial total de produção de biogás a partir do tratamento anaeróbico de vinhaça de cachaça, pode atingir 7,6 milhões de Nm<sup>3</sup> de biogás por ano, sendo 3,7 milhões de Nm<sup>3</sup> em associado com a agricultura familiar. O biogás poderia ser utilizado localmente, uma vez que a fabricação de cachaça apresenta uma demanda expressiva de energia em seus processos, como no aquecimento do mosto e na destilação.

### 3.8 Uso do biofertilizante no canavial: economia com fertilizantes

As principais vantagens da biodigestão da vinhaça, além da produção do biogás, são a conservação dos nutrientes, principalmente o potássio, o aumento da concentração do fósforo disponível e do nitrogênio amoniacal, e a elevação do pH do efluente. A biodigestão da vinhaça favorece a aplicação dos efluentes como biofertilizante na fertirrigação (SAC/ADAS, 2007).

A qualidade do material digerido na biodigestão e o potencial para uso agrônomo dependem de diversos fatores, como a composição e variabilidade dos resíduos utilizados como substratos, tipo de biodigestor e tecnologia de biodigestão utilizada, segregação e perdas de nutrientes nas estruturas do produto final da digestão, eficiência dos sistemas pré-tratamento do substrato ou do tratamento do material digerido e da diluição da vinhaça digerida com água (KUNZ et al., 2019).

A utilização de 150 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de vinhaça in natura como fertilizante via fertirrigação promove a inclusão no sistema solo-planta de aproximadamente 61 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio, 40 kg.ha<sup>-1</sup> de fósforo, 343 kg.ha<sup>-1</sup> de potássio, 108 kg.ha<sup>-1</sup> de cálcio e 80 kg.ha<sup>-1</sup> de enxofre. Ressalta-se que a disponibilidade de potássio na vinhaça digerida após a biodigestão é a mesma da vinhaça antes do processo. Sem remoção de potássio durante a biodigestão, permanece a necessidade de ajustar a dosagem da vinhaça digerida de acordo com as características do solo (SALOMON et al., 2011).

### 3.9 Políticas de incentivo e tributação aplicada a biogás

O Brasil tem uma grande disponibilidade de matérias primas e resíduos que podem ser utilizados como fontes renováveis em sua matriz energética. Essa variedade compreende os biocombustíveis líquidos (etanol e biodiesel), os biocombustíveis sólidos (lenha e bagaço de cana) e os gasosos, com participação ainda reduzida do biogás (EPE, 2018).

O PROBIOGÁS é um projeto que teve origem na cooperação técnica entre a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, do Ministério das Cidades, e o governo alemão, por meio da GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*). A parceria tinha como objetivo aprimorar e ampliar o uso energético eficiente do biogás e, por conseguinte, a redução de emissões de metano e de dióxido de carbono na atmosfera. Esses projetos devem ser desenvolvidos em parcerias, em rede nos âmbitos governamental, acadêmico e empresarial.

O Brasil assumiu na COP21, em 2015, o compromisso voluntário de redução de suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 43%, ano base 2005, até 2030. Para alcançar esta meta, uma série de adequações e ajustes terão de ser realizados. O RenovaBio, programa do Governo Federal, lançado pelo Ministério de Minas e Energia, em dezembro de 2017 foi criado com o objetivo de aumentar a participação da bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para 18%, até 2030.

Segundo Burke (2001), o sistema de biodigestão anaeróbia utilizando a vinhaça como matéria prima do processo pode também ser utilizado no mercado de créditos de carbono. Anos atrás, a iniciativa de projetos inovadores utilizando biodigestores foi identificada como adequada ao programa *American Carbon Registry* (ACR), classificado no sistema de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (CGEE, 2010).

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biogás é uma fonte renovável de energia, podendo ser alternativa na obtenção de eletricidade, reduzindo a dependência de outras fontes energéticas e podendo ser utilizado no próprio sistema produtivo da agroindústria. Os pequenos produtores de cachaça podem suprir parcialmente suas próprias demandas realizando a queima do gás para aquecer o mosto e destilar a cachaça. A vantagem não está somente na geração de energia, mas também na possível solução dos problemas do gerenciamento do resíduo industrial. O tratamento da vinhaça a partir da biodigestão também origina fertilizantes organominerais com características mais adequadas na disponibilização dos nu-

trientes minerais para o solo e as plantas.

Os resultados demonstram que a digestão anaeróbica da vinhaça pode ser uma das formas promissoras para reduzir os impactos ambientais do rejeito oriundo da fabricação de cachaça artesanal, pela redução de sua demanda química de oxigênio (DQO).

O estado de Minas Gerais é o maior produtor de cachaça e aguardente do país, destacando-se também como grande produtor de cachaça artesanal oriundo da agricultura familiar. Considerando a grande quantidade de vinhaça produzida no estado, a estimativa de produção de biogás pelos pequenos produtores é de 3,7 milhões de Nm<sup>3</sup>.

## 5. AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho contou com o apoio da CAPES e PRPPG-UFVJM, através de uma bolsa de doutorado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRABE. Associação Brasileira de bebidas. Mercado, Categorias. 2015. Disponível em:< <https://www.abrabe.org.br/categorias/>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2020.

BARBOSA, E. A. Caracterização molecular e bioquímica de linhagens de *Saccharomyces cerevisiae* da região de Salinas para fins de identificação geográfica. 140p. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto. 2013.

BARROS, R.; VIÉGAS, P.; HOLANDA, F. Estudo dos Efeitos da Aplicação da Vinhaça na Qualidade de Solos em Cultivo de Cana-de-Açúcar (*Saccharum officinarum* L.), e o Uso de Indicadores no Sistema de Produção. 2009.

BARROS, V. G. D. et al. Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of *Methanothermobacter* and *Methanosarcina* archaea and *Thermotogae* bacteria. *Bioresource Technology*, v.244, p. 371-381, 2017.

BORGES, A. F.; TAKEMOTO, S. N. C. Inovação no setor de cachaça artesanal: estudo de caso. *Revista Pensamento Contemporâneo em Administração*, v.13, n.1, p. 79-99, 2019.

BRAMLEY, J. et al. Agricultural biogas in the United States. A Market Assessment. Tufts University Urban & Environmental Policy & Planning.–Field Project Team, v. 6, 2011.

BRASIL. Decreto nº 6871 de 04 de junho de 2009. Regulamenta a lei nº 8918 de 14 de julho de 1994. Dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. A cachaça no Brasil: dados de registro de cachaças e aguardentes / Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA/AECE, 27 p., 2019.

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

CAMPELO, E. A. P. Agronegócio da cachaça de alambique de Minas Gerais: panorama econômico e social. Informe Agropecuário, v. 23, p. 7-18, 2002.

CAMPOS, C. R. Monitoramento da microbiota e dos parâmetros físico-químicos em vinhoto. 97p. (Doutorado). UFLA, 2009.

CARDOSO, M. Production of Spirit Sugarcane: Produção de Aguardente de Cana. UFLA, Lavras, MG, Brazil, 2013.

CARDOSO, M. D. G. Produção de aguardente de cana-de-açúcar. 2ª. UFLA, 2006. 445

CASTRO E SILVA, P. Desempenho de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente como unidade de tratamento para efluente da suinocultura. 102 Dissertação (Mestrado em Tecnologias e Inovações Ambientais). UFLA, 2014.

CHRISTOFOLETTI, C. A. et al. Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. Waste Management, v. 33, n. 12, p. 2752-2761, 2013.

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

CRUZ, A. C.; TEIXEIRA, E. C.; CASTRO, E. R. A importância do agronegócio no estado de Minas Gerais: uma análise insumo-produto. Anais do XIV Seminário sobre a Economia Mineira, Cedeplar. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

DAMIANO, E. D. S. G. Tratamento da vinhaça em reator anaeróbio de leito fluidificado. Universidade de São Paulo, 2005.

DE OLIVEIRA, B. G. et al. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. Geoderma, v. 200, p. 77-84, 2013.

E SILVA, J. H. D. N.; VERRUMA-BERNARDI, M. R.; DE OLIVEIRA, A. L. Cachaça Production in Brazil and its Main Contaminant (Ethyl Carbamate). *Scientia Agricola*, v. 77, n. 2, 2020.

EPE, E. D. P. E. Análise de conjuntura dos biocombustíveis—ano 2018. Brasília. Ministério de Minas e Energia, 2018.

ESPANA-GAMBOA, E. et al. Vinasses: characterization and treatments. *Waste management & research*, v. 29, n. 12, p. 1235-1250, 2011.

ESPAÑA-GAMBOA, E. I. et al. Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. *Biotechnology for Biofuels*, v. 5, p. 82-82, 2012.

FEAM, F. E. D. M. A. Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria. p. 11p, 2015.

FEAM. Produção de biogás a partir da vinhaça gerada em pequenas fábricas de aguardente e cachaça artesanal no estado de Minas Gerais. 2016.

FEIJÓ, A.; MACIEL, E. Cachaça artesanal: do alambique à mesa. Senac, 2002.

FEITOSA, P. C. L. A cachaça como identidade cultural. Universidade de Brasília. 2005.

FUESS, L. T. Biodigestão anaeróbia termofílica de vinhaça em sistemas combinados do tipo acidogênico-metanogênico para potencialização da recuperação de bioenergia em biorrefinarias de cana-de-açúcar de primeira geração. Universidade de São Paulo. 2017.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. *Journal of environmental management*, v. 145, p. 210-229, 2014.

FUESS, L. T. et al. Diversifying the technological strategies for recovering bioenergy from the two-phase anaerobic digestion of sugarcane vinasse: An integrated techno-economic and environmental approach. *Renewable Energy*, v. 122, p. 674-687, 2018.

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

GRANATO, E. F. Geração de energia elétrica pela biodigestão anaeróbica da vinhaça. 103p. (Mestrado) UNESP, 2003.

IBRAC-INSTITUTO BRASILEIRO DA CACHAÇA. Notícias do IBRAC. 2019.

IBGE, Censo Agropecuario -2017. Resultados definitivos. IBGE, 2017.

INOVAGRID. Geração de energia com biogás, 2017. Disponível em< [www.inovagrid.com](http://www.inovagrid.com)>. Acesso em: 06 de janeiro de 2020.

JIANG, Z.-P. et al. Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. *Sugar Tech*, v. 14, n. 4, p. 412-417, 2012.

JOHANSSON, THOMAS B.; KELLY, HENRY; REDDY, AMULYA K. N.; AND WILLIAMS, ROBERT H. "Renewable Fuels and Electricity for a Growing World Economy: Defining and Achieving the Potential," *Energy Studies Review*: v. 4, n.. 3, 1992.

KOTHARI, R. et al. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 174-195, 2014.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Embrapa Suínos e Aves-Livro científico, 2019.

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. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2006.

MAIA, A. B. R. D. A.; CAMPELO, E. A. P. Tecnologia da cachaça de alambique. SEBRAE-MG, 2006.

MALAJOVICH, M. A. *Biotecnologia 2011*. Rio de Janeiro, Edições da Biblioteca Max Feffer do Instituto de Tecnologia ORT, 2012.

MORAES, B. S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? *Applied Energy*, v. 113, p. 825-835, 2014.

MORAES, B. S. et al. Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestion. *Applied Energy*, v. 189, p. 21-30, 2017.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 888-903, 2015.

NEVES, N. Produção de hidrogênio e metano via codigestão anaeróbia em reatores de dois estágios a partir de resíduo alimentar e lodo do tratamento de vinhaça. 2016.

NIGRI, E. M. et al. PRODUÇÃO INTEGRADA: Aplicação de Novas Tecnologias e Formas de Gestão Para Diminuição de Custos e Impactos Ambientais no Processo de Produção de Cachaça COF11-0427. 2011.

NOGUEIRA LIZ, C. et al. Produção de cachaça artesanal e seu contexto: um estudo de caso com alambiques do sul de minas gerais. Revista da UIIPS, v. 4, n. 4, 2016.

OLIVEIRA, E. L. et al. Uso da vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de- -açúcar irrigada e não irrigada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 44, n. 11, p. 1.398-1.403, 2009.

OLIVEIRA, F. Vinhaça: O Futuro da Bioeletricidade, Tecnologia em Biocombustíveis. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, SP, 2012.

OLIVEIRA, D. C. S. Otimização da produção de biogás a partir da biodigestão da vinhaça de fabricação da cachaça artesanal. 72p. (Mestrado em Biocombustíveis), UFVJM. 2019.

PAULO, C. D. et al. Produção de cachaça artesanal com cepas de leveduras selvagens. Nativa-Revista de Ciências Sociais do Norte de Mato Grosso, v. 5, n. 2, 2016.

PINTO, M. P. M. et al. Co-digestion of coffee residues and sugarcane vinasse for biohythane generation. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 6, n. 1, p. 146-155, 2018.

POMPERMAYER, R. de S.; PAULA JUNIOR, D. R. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas. 2000.

SAC/ADAS (2007): Nutrient Value of Digestate from Farm-Based Biogas Plants in Scotland. Report for Scottish Executive Environment and Rural Affairs Department. Department ADA/009/06. ADAS UK Ltd. Wolverhampton. Disponível em: <<http://www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/1057/0053041.pdf>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2020.

SALOMON, K. R. et al. Cost calculations for biogas from vinasse biodigestion and its energy utilization. Sugar Industry, v. 136, n. 4, p. 217-223, 2011.

SATYAWALI, Y.; BALAKRISHNAN, M. Removal of color from biomethanated distillery spentwash by treatment with activated carbons. Biore-source Technology, v. 98, n. 14, p. 2629-2635, 2007.

SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Participação das Micro e Pequenas Empresas na Economia Brasileira. Brasília: SEBRAE, UGE - Unidade de Gestão Estratégica – Núcleo de Estudos e Pesquisas, Julho 2013. 108 p.

SILVA, D. R. D. A mitologia na representação cultural e no consumo: efeito e recepção do signo da cachaça. Universidade Federal de Pernambuco. 2009.

SIVALOGANATHAN, P. et al. Effect of dilution of treated distillery effluent (TDE) on soil properties and yield of sugarcane. *American Journal of Plant Sciences*, v. 4, n. 09, p. 1811, 2013.

SOUZA, M. E., FUZARO, G.; POLEGATO, A. R. Thermophilic Anaerobic Digestion of Vinasse in Pilot Plant UASB Reactor. *Water Science and Technology*, v. 25, n. 7, p. 191-200, 1992.

TAVARES, E. D. F. L. Desenvolvimento de eletrodo modificado com nanotubos de carbono e ácido ascórbico para determinação simultânea de cobre e chumbo em cachaça. 72p. (Mestrado em Agroquímica, Universidade Federal de Lavras, 2010.

TUNES, C. R. Produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de efluentes orgânicos em reator UASB. 2017.

VAN LIER, J. et al. Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 14, n. 4, p. 681-702, 2015.

VERDI, A. R. Dinâmicas e perspectivas do mercado da cachaça. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 93-8, 2006.

VOLPINI, V. et al. Biomethane generation in an AnSBBR treating effluent from the biohydrogen production from vinasse: Optimization, metabolic pathways modeling and scale-up estimation. *Renewable Energy*, v. 116, p. 288-298, 2018.

YOKOYA, F. Fabricação de cachaça de cana. Campinas: Fundação Tropical. 1995.